



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

EERO ALKKIOMÄKI
MIL-STD-1553:N SOVELTAMINEN
TEOLLISUUDEN TURVA-AUTOMAATIOON

Diplomityö

Tarkastajat:
professori Lauri Sydänheimo,
dosentti Leena Ukkonen
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
automaatio-, kone- ja materiaali-
tekniikan tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 04.11.2009

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

ALKKIOMÄKI, EERO:

MIL-STD-1553:n soveltaminen teollisuuden turva-automaatioon

Diplomityö, 93 sivua, 35 liitesivua

Maaliskuu 2010

Pääaine: Elektroniikan laitesuunnittelu

Tarkastajat: professori Lauri Sydänheimo, dosentti Leena Ukkonen

Avainsanat: MIL-STD-1553, turva-automaatio, turvaväylä, IEC 61508

Nykyaikaisessa teollisessa tuotannossa prosessien, koneiden ja yksittäisten laitteiden riskejä voidaan vähentää monin tavoin. Huolellisen automaatiojärjestelmän suunnittelun jälkeen turva-automaatio on eräs tärkeimmistä menetelmistä toiminnallisen turvallisuuden varmistamisessa. Käyttöautomaatiosta erillinen turva-automaatio pyrkii estämään prosessin tai järjestelmän joutumisen vaaralliseen tilaan. Viimeisen vuosikymmenen aikana turva-automaatio on käyttöautomaation tapaan siirtymässä väyläpohjaiseksi. Kriittiset anturi- ja toimilaitesignaalit kulkevat yhä enenevässä määrin digitaalisissa kenttäväylissä – eli turvaväylissä.

MIL-STD-1553 on Yhdysvaltain puolustushallinnon 1970-luvulla kehittämä aikajakoinen sarjaväylä erityisesti sotilasilmailun tarpeisiin. Tämän diplomityön tavoitteena oli kehittää koelaitteisto, jolla voitiin selvittää MIL-STD-1553-väylän soveltuvuutta teollisuuden turvaväyläksi. Työssä suunniteltiin ja toteutettiin yleiskäyttöinen väyläliityntämoduuli, hajautettu IO-yksikkö sekä väyläohjainlaite. Lisäksi laitteille kehitettiin monipuoliset ohjelmistot.

Koelaitteiston suorituskykyä mitattiin vasteaikojen ja välityskyvyn avulla. Mittausten perusteella työssä toteutettu laitteisto on suorituskykynsä puolesta jopa kaksisataa kertaa nopeampi yleisimpiin kaupallisiin turvaväyliin verrattuna. Luotettavuuden osalta kymmeniä vuosia avioniikassa, avaruustekniikassa ja muussa korkean luotettavuuden elektroniikassa käytetty MIL-STD-1553 on ylivoimainen, joten se soveltuisi erinomaisesti turvaväyläksi kriittisiin automaatiojärjestelmiin. Teknologian laajamittaisen teollisen hyödyntämisen esteenä ovat kuitenkin toistaiseksi korkeat kustannukset sekä tiukka kilpailutilanne nykyisten turvaväylästandardien välillä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Automation Technology

ALKKIOMÄKI, EERO: MIL-STD-1553 in Industrial Safety Automation

Master of Science Thesis, 93 pages, 35 appendix pages

March 2010

Major: Hardware Design of Electronics

Examiners: Professor Lauri Sydänheimo, Adjunct Professor Leena Ukkonen

Keywords: MIL-STD-1553, safety automation, safety bus, IEC 61508

In modern industrial manufacturing, the risks of processes, machines and single devices can be reduced in many ways. Safety automation is after careful planning one of the most important procedures in ensuring functional safety. The basic automation system is separate from safety automation, which tries to prevent the process or system from getting into a dangerous state. During the last decade, safety automation has been moving away from the centralized control model towards distributed solutions. Critical sensor and actuator signals are more and more transferred over digital fieldbuses or to be more precise, over safety buses.

MIL-STD-1553 is a military standard published by the United States Department of Defense in the 1970s. It is a time division multiplexed serial data bus that is especially designed for military avionics. The research goal of this thesis was to design a test set-up, which was used to find out if MIL-STD-1553 is suitable for being a safety bus in industrial automation systems. A generic bus interface module, distributed IO device and bus controller device were designed and implemented during the thesis process. Additionally, a versatile software was written for the devices.

The performance of the test set-up was measured by using response time and throughput as metrics. According to the performance measurements, MIL-STD-1553 based test set-up is up to two hundred times faster than common commercial safety automation solutions. As for reliability, MIL-STD-1553 has been used in avionics, space systems and other high reliability electronics for many decades and thus it is a superior alternative for critical systems. However, the tight competition situation of the safety automation market and high expenses prevent the wider use of the technology in industrial automation.

ALKUSANAT

Diplomityöni aihe muotoutui kiinnostuksesta korkean luotettavuuden elektroniikkaa sekä teollisuuden väyläratkaisuja kohtaan. Lopullinen sysäys työlle tuli kuitenkin Tampereen teknillisen yliopiston opiskelijoiden Itikka-projektista, johon suunniteltiin lentotietokoneen vuonna 2008. Euroopan avaruusjärjestön tukemassa projektissa testattiin inertiaalimittauslaitteiston toimivuutta avaruuteen ulottuneen rakettilennon aikana. Diplomityö perustuu Itikka-projektin keskeisiin teknologioihin, joten ilman kyseistä projektia tämä työ olisi todennäköisesti lopputulokseltaan varsin toisenlainen.

Haluan kiittää professori Lauri Sydänheimoa ja dosentti Leena Ukkosta diplomityön tarkastamisesta sekä elektroniikan laitosta osallistumisesta työssä toteutetun laitteiston kustannuksiin. Erityiskiitokset kuuluvat kuitenkin vanhemmilleni ja sis-kolleni arvokkaasta tuesta diplomityöprosessin aikana.

Tampereella 5. maaliskuuta 2010

Eero Alkkiomäki

SISÄLTÖ

1. Johdanto	1
2. MIL-STD-1553	3
2.1 Väylästandardin esittely	3
2.2 Väyläkomponentit	4
2.2.1 Väyläohjain	4
2.2.2 Etäterminaali	5
2.2.3 Väylämonitori	6
2.2.4 Passiiviset komponentit	6
2.3 Väylärakenne ja kaapelointi	6
2.4 Sähköinen toteutus	7
2.5 Protokollan sanatyypit	8
2.5.1 Komentosana	9
2.5.2 Datasana	9
2.5.3 Tilasana	10
2.6 Protokollan viestityypit	10
2.6.1 Tiedonsiirto väyläohjaimelta etäterminaalille (BCRT-viesti)	10
2.6.2 Tiedonsiirto etäterminaalilta väyläohjaimelle (RTBC-viesti)	10
2.6.3 Tiedonsiirto etäterminaalilta toiselle (RTRT-viesti)	11
2.6.4 Moodikomentoviestit (MCC-viestit)	11
2.6.5 Yleislähetysviestit	12
2.7 Toteutusvaihtoehdot	12
2.8 Rajoitteet	14
2.8.1 Tekniset rajoitteet	14
2.8.2 Muut rajoitteet	15
3. Turva-automaatio	17
3.1 Turva-automaatio käsitteenä	17
3.2 Toiminnallinen turvallisuus	18
3.2.1 Toiminnallisen turvallisuuden malli	18
3.2.2 Turvallisuuden eheystaso	18
3.3 Turva-automaation vaatimuksia	20
3.4 Turvaväylät	22
3.4.1 Turvaväylät käsitteenä	22
3.4.2 Turvaväylien tekninen toteutus	22
3.4.3 Katsaus yleisimpiin turvaväyliin	24

3.4.4	PROFIsafe	24
3.4.5	SafetyBUS p	27
3.4.6	DeviceNet Safety	28
4.	Laitteisto	30
4.1	Laitteiston esittely	30
4.2	Väyläliityntämoduuli (1553TRC)	30
4.2.1	Toiminta-ajatus ja rakenne	30
4.2.2	Mikrokontrolleri	31
4.2.3	MIL-STD-1553-toteutus	32
4.2.4	Moduuliliityntä	34
4.2.5	Tehonsyöttö ja muut osiot	35
4.2.6	Piirilevysuunnittelu	36
4.3	Hajautettu IO-yksikkö (ADIO1)	37
4.3.1	Toiminta-ajatus ja rakenne	37
4.3.2	Analogiset mittaukset ja ulostulot	38
4.3.3	Digitaaliset anturi- ja toimilaiteliitännät	40
4.3.4	Mikrokontrolleri ja muistit	42
4.3.5	Muut osiot ja toiminnot	43
4.3.6	Tehonsyöttö	44
4.3.7	Piirilevysuunnittelu	46
4.3.8	Mekaaninen rakenne	47
4.4	Väyläohjain (TRC-ADA)	48
4.4.1	Toiminta-ajatus ja rakenne	48
4.4.2	Mikrokontrolleri	49
4.4.3	Liitynnät	50
4.4.4	Tehonsyöttö	51
4.4.5	Piirilevysuunnittelu	51
4.4.6	Mekaaninen rakenne	52
4.5	Väyläkaapelointi	53
4.5.1	Yleistä	53
4.5.2	Testikaapelointi	54
4.5.3	Käytännön kaapelointi	55
5.	Ohjelmisto	56
5.1	Laitteiston ohjelmistokehitys	56
5.2	TRCCOMM-protokolla	56
5.2.1	Kuvaus ja tarkoitus	56

5.2.2	TRCCOMM alijärjestelmässä (isäntä)	57
5.2.3	TRCCOMM väyläliityntämoduulissa (renki)	58
5.2.4	TRC:n ja alijärjestelmän kommunikaatio	59
5.3	Väyläliityntämoduuli (1553TRC)	60
5.3.1	Valitut toteutustavat	60
5.3.2	Laitteistorajapinnat	60
5.3.3	MIL-STD-1553-väyläohjain	62
5.3.4	MIL-STD-1553-etäterminaali	64
5.4	Hajautettu IO-yksikkö (ADIO1)	66
5.4.1	Valitut toteutustavat	66
5.4.2	Tapahtumakäsittelijä	67
5.4.3	Komentorivikäyttöliittymä ja asetukset	69
5.4.4	Laitteistorajapinnat	70
5.5	Väyläohjain (TRC-ADA)	71
5.5.1	Valitut toteutustavat	71
5.5.2	Komentorivikäyttöliittymä	72
5.5.3	Kyselylistakomennot	73
5.5.4	Väylänhallintakomennot	74
5.5.5	Muut komennot	75
6.	Testaus ja tulokset	77
6.1	Toiminnallinen testaus	77
6.1.1	Sähköinen testaus	77
6.1.2	Väylätoimintojen testaus	78
6.2	Suorituskykymittaukset	80
6.2.1	Testijärjestelmän kuvaus	80
6.2.2	Testijärjestelmän välityskyky	83
6.2.3	Testijärjestelmän vasteajat	83
6.3	Tulosten analysointi	84
6.3.1	Suorituskyky	84
6.3.2	Luotettavuus	84
6.3.3	Vertailua kaupallisiin ratkaisuihin	85
7.	Johtopäätökset	87
	Lähteet	88
	Liite 1: Väyläliityntämoduulin kytkentäkaavio	94
	Liite 2: Väyläliityntämoduulin piirilevykuvat	96
	Liite 3: Väyläliityntämoduulin komponenttilistaus	99

Liite 4: IO-yksikön kytkentäkaavio	102
Liite 5: IO-yksikön piirilevykuvat	107
Liite 6: IO-yksikön komponenttilistaus	111
Liite 7: TRC-ADA:n kytkentäkaavio	117
Liite 8: TRC-ADA:n piirilevykuvat	119
Liite 9: TRC-ADA:n komponenttilistaus	122
Liite 10: TRCCOMM-protokollan kuvaus	124

LYHENTEET JA TERMIT

1553TRC	Väyläliityntämoduuli MIL-STD-1553:lle
AD	Analog/Digital
ADIO1	Hajautettu IO-yksikkö
ARM7TDMI	32-bittinen mikroprosessoriydin
AVR	8-bittinen mikrokontrolleriarkkitehtuuri
BC	MIL-STD-1553 Bus Controller (väyläohjain)
BCRT	Tiedonsiirto väyläohjaimelta etäterminaalille
BM	MIL-STD-1553 Bus Monitor (väylämonitori)
CAN	ControllerArea Network
CLI	Command Line Interface
CRC	Cyclic Redundancy Check
DA	Digital/Analog
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FDL	Fieldbus Data Link
FIFO	First In, First Out
FPGA	Field Programmable Gate Array
GPIO	General Purpose Input/Output
IEC	International Electrotechnical Commission
IO	Input/Output
IP	Intellectual Property
ITAR	International Traffic in Arms Regulations
JTAG	Joint Test Action Group

LC	Kela-kondensaattori
MCC	Mode Code Command (moodikomento)
MIL-STD	Military Standard
OSI	Open Systems Interconnection
QFP	Quad Flat Package
RS-232	Recommended Standard 232
RS-422	Recommended Standard 422
RT	MIL-STD-1553 Remote Terminal (etäterminaali)
RTBC	Tiedonsiirto etäterminaalilta väyläohjaimelle
RTRT	Tiedonsiirto etäterminaalilta toiselle
SFF	Safe Failure Fraction
SIL	Safety Integrity Level
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
TRC	Transceiver Card
TRC-ADA	Transceiver Card Adapter
TRCCOMM	Transceiver Card Communication protocol
TTL	Transistor-Transistor Logic
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UML	Unified Modeling Language
UNIX	Alunperin ATT:n kehittämä käyttöjärjestelmä
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter
XOR	Exclusive or

1. JOHDANTO

Teollisuusautomaation monimutkaistuesssa ja laajentuessa uusille osa-alueille yhä tärkeämmäksi tavoitteeksi on tullut ihmisten, ympäristön ja omaisuuden turvaaminen [52, s. 11]. Automaatiota voidaan hyödyntää tuotantoon liittyvien toimintojen lisäksi myös turvallisuuden varmistamisessa, jolloin puhutaan turva-automaatiosta. Antureiden ja toimilaitteiden automaatiojärjestelmään liittämisenä on kuljettu 1940-luvun pneumaattisista viesteistä analogisten jännite- ja virtaviestien kautta nykyisiin digitaalisiin kenttäväyliin [52, s. 28]. Käyttöautomaation lisäksi myös turva-automaatio hyödyntää yhä enenevässä määrin digitaalista väyläteknologiaa eli turvaväyliä.

Nykyisin markkinoilla on kymmeniin erilaisiin turvaväyliin pohjautuvia turvakomponentteja, joita käytetään muun muassa prosessiteollisuudessa, koneautomaatiossa sekä liikkuvissa työkoneissa. Laajasta tarjonnasta huolimatta tarjolla olevat ratkaisut ovat keskenään hyvin samankaltaisia ja turvallisuustason osalta eri turvaväylien välillä ei ole suuria eroja. Useimmat turvaväylät ovat haavoittuvia yksittäisille vioille, sillä tyypillisesti väylän kahdennus ei ole joko mahdollista tai sen toteutus ei ole kaikin osin luotettavaa. Väyläkaapelin katkeaminen tai vioittuminen aiheuttaa kahdentamattomissa järjestelmissä koko turva-automaatiojärjestelmän halvaantumisen, jolloin erityisesti prosessiautomaation tapauksessa turvallisuus voi vaarantua tuhoisin seurauksin.

MIL-STD-1553 on alun perin sotilasilmailun tarpeisiin kehitetty avioniikkaväylä, joka on deterministinen ja luontaisesti kahdennettu. Tiukat reaaliaikavaatimukset täyttävälle ja korkean luotettavuuden omaavalle MIL-STD-1553:lle on myöhemmin löytynyt laajalti käyttöä myös muilta puolustushaaroilta sekä avaruustekniikasta [51, s. 1]. Siviilipuolella MIL-STD-1553:a on käytetty joissain kehittyneissä lentokoneissa ja muun muassa Lontoon metron sähköjunissa, mutta muuten väylän hyödyntäminen kaupallisissa ja teollisissa sovelluksissa on olematonta [51, s. 5].

MIL-STD-1553:n käyttäminen turvaväylänä voisi parantaa oleellisesti kriittisten prosessien turvallisuutta väylän erinomaisen luotettavuuden ja reaaliaikaisuuden ansiosta. Työn tavoitteena on suunnitella ja rakentaa koelaitteisto, jolla tutkitaan MIL-STD-1553-väylän soveltuvuutta teollisuusautomaatiossa käytettäväksi turvaväyläksi. Koelaitteisto koostuu yleiskäyttöisistä väyläliityntämoduuleista, hajauteista IO-yksiköistä sekä turvaväylän toimintaa ohjaavasta väyläohjaimesta. Järjestelmän suorituskykyä mitataan kahden IO-yksikön välisillä vasteaika- ja välityskykytesteillä, joiden tuloksia verrataan kaupallisiin turvalaiteratkaisuihin. Työ on luonteeltaan laajamittainen laitesuunnitteluprojekti, jossa painotetaan erityisesti laitteiston ja ohjelmiston osuutta.

Työssä on laajuuden vuoksi keskitytty teorian osalta ainoastaan kahteen keskeisimpään käsitteeseen: MIL-STD-1553-standardiin ja turva-automaatioon. Laitteistoa ja ohjelmistoa käsitellään yksityiskohtaisesti, kuitenkin olettaen lukijalla olevan perustiedot sulautettujen järjestelmien laitesuunnittelusta ja ohjelmistokehityksestä. Koelaitteiston laajamittaiset testit ja luotettavuuden määrittäminen turvalaitestandardien mukaisesti on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

Diplomityö on jaettu seitsemään lukuun. Työn kannalta keskeisintä teknologiaa, MIL-STD-1553-väylästandardia, käsitellään teoreettisesti luvussa 2. Luku 3 puolestaan käsittelee teollisuuden turva-automaatiota sekä erityisesti turvaväyliä. Kaupallisten turvaväylästandardien esittelyssä painotetaan niitä ominaisuuksia, jotka ovat johdonmukaisesti MIL-STD-1553:een vertailtavissa. Luvut 2 ja 3 toimivat teoreettisena taustana käytännön toteutukselle, joka esitellään luvussa 4. Työtä varten suunniteltu ja toteutettu koelaitteisto käydään läpi seikkaperäisesti. Kolmen työssä toteutetun sulautetun ohjelmiston toimintaa ja toteutustapoja on käsitelty kattavasti viidennessä luvussa. Koelaitteiston testausjärjestelyt ja mittaustulokset on esitetty luvussa 6, jossa lisäksi analysoidaan saatuja tuloksia ja vertaillaan niitä kaupallisiin ratkaisuihin. Lopuksi luku 7 sisältää yhteenvedon työstä. Laitesuunnittelun keskeisin dokumentaatio esitetään liitteinä, joita on tässä työssä kymmenen kappaletta. Ohjelmalistauksia ei ole sisällytetty tähän diplomityöhön niiden pituuksien vuoksi.

2. MIL-STD-1553

2.1 Väylästandardin esittely

MIL-STD-1553 on Yhdysvaltain puolustushallinnon kehittämä sotilasstandardi, joka määrittelee aikajakoisen sarjaväylän sähköiset ja toiminnalliset ominaisuudet. Väylä siirtää tietoa väyläohjaimen ja etäterminaalien välillä 1 Mb/s:n nimellisnopeudella suojatuiissa parikaapeleissa. MIL-STD-1553-väylä on kahdennettu koko väylätoteutuksen osalta kahden toisistaan riippumattoman kanavan avulla – joskin joissain sovelluksissa voidaan käyttää jopa kolmin- tai nelinkertaista redundanssia [61, k. 60.2.2.4]. Väyläliikenne on standardissa tarkoin määriteltä, ja tiukkojen ajoitusvaatimusten vuoksi se on erittäin reaaliaikainen ja deterministinen. [59]

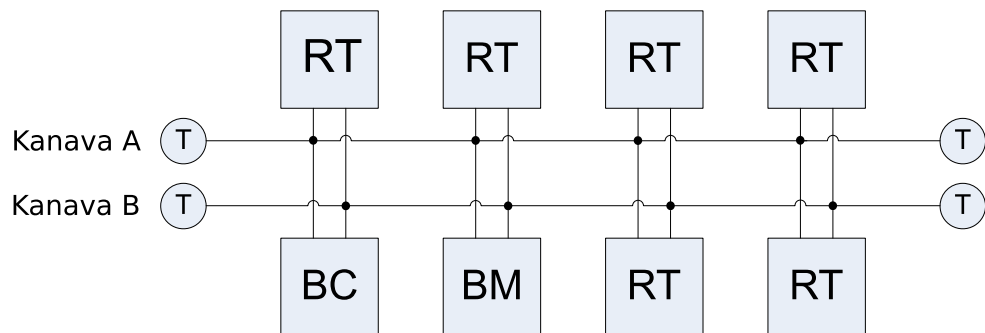
Standardin kehittäminen sai alkunsa jo 1960-luvun lopulla, jolloin sotilaslentokoneiden avioniikan ja radioteknisten oheislaitteiden määrä kasvoi nopeaan tahtiin digitaalitekniikan kehittyessä. Tuolloin avioniikan kaapelointi tehtiin suorilla johdotuksilla laitteista toisiin, mikä oli asennettavuuden, huollettavuuden ja massarajoitusten vuoksi epäedullista. Puolijohdeteknologian nopean kehityksen myötä lukuisat yksittäiset signaali-kaapeloinnit oli mahdollista korvata digitaalisella väylällä. Vuonna 1973 esiteltiin MIL-STD-1553:n ensimmäinen versio, jota käytettiin ensimmäisen kerran General Dynamicsin F-16-hävittäjälentokoneessa. Tämän jälkeen on valmistettu lukuisia väylää hyödyntäviä ilma-aluksia ja muita sotilaspuolen järjestelmiä. MIL-STD-1553 on rantautunut myös siviilikäyttöön muun muassa tietoliikennesatelliittien, maanalaisien junien ja Kansainvälisen avaruusaseman (International Space Station, ISS) myötä. Tätä kirjoitettaessa lähes neljä vuosikymmentä aktiivisessa käytössä ollut MIL-STD-1553 on edelleen relevantti uusien korkean luotettavuuden järjestelmiä suunniteltaessa. [14, s. 2 – 6]

Standardin tuorein B-versio vuodelta 1978 pitää sisällään ainoastaan pieniä muutoksia ja tarkennuksia MIL-STD-1553:n ensimmäiseen versioon nähden. Myöhemmin standardiin on julkaistu muutamia lisäyksiä, joiden noteeraaminen ei ole pa-

kollista. Standardista on olemassa myös kuituoptinen versio MIL-STD-1773, jota ei tosin ole tietävästi hyödynnetty laajemmin. MIL-STD-1553 on myös julkaistu täysin yhteensopivina Naton STANAG 3838AVS ja Iso-Britannian DEF STAN 00-18 -standardeina sisällöllisesti uudelleen muotoiltuina [14, s. 6]. Vuonna 1984 julkaistu MIL-HDBK-1553 on laaja sovellusopas standardille; se koostuu suunnittelu- ja testausohjeistuksen lisäksi muun muassa lukuisista käytännön esimerkeistä [61, k. 70.]. Myöhemmin standardin ylläpito jaettiin SAE-organisaation kanssa, jonka jälkeen muutamat MIL-STD-1553:n testaukseen liittyvät dokumentit on julkaistu ainoastaan SAE:n kautta [9, s. 12].

2.2 Väyläkomponentit

MIL-STD-1553-väylällä voi olla kolmenlaisia aktiivisia laitteita, jotka ovat väyläohjain (Bus Controller, BC), etäterminaali (Remote Terminal, RT) ja väylämonitori (Bus Monitor, BM) [59, k. 3.11 – 3.13]. Passiivisia väyläkomponentteja ovat muun muassa haaroittimet ja terminaattorit. Kuvassa 2.1 on esitetty esimerkki yksinkertaisesti MIL-STD-1553-pohjaisesta järjestelmästä. Kirjain 'T' merkitsee väylän päättävää terminaattoria.



Kuva 2.1: Esimerkki MIL-STD-1553-väylästä

2.2.1 Väyläohjain

Väyläohjain on väylän toiminnan kannalta keskeinen laite, joka aloittaa kommunikation etäterminaalien kanssa. Standardin mukaan samaan aikaan väylällä voi olla ainoastaan yksi väyläohjain aktiivisena, mutta passiivisia väyläohjaimia voi olla useampia. Tämä rakenne mahdollistaa väylän ajoitusten suunnittelun toistettavasti ja ennustettavasti; viestien törmäykset eivät ole MIL-STD-1553:ssa normaalisti mahdollisia. [14, s. 14]

Tyypillisesti väyläohjain on korkean prosessointikapasiteetin omaava tietokone, jossa on yksi tai useampia MIL-STD-1553-väyliä. Vaikka mittausinformaation käsittely ja tiedon prosessointi usein tapahtuvatkin väyläohjaimessa, myös täysin päinvastainen lähestymistapa on mahdollinen. Tällöin väyläohjain toimii yksinkertaisena keskittimenä, joka välittää tietoa etäterminaalien välillä. [14, s. 14]

Väyläohjaimen MIL-STD-1553-toiminnallisuus on usein hajautettu omalle väyläprossessorilleen, joka liittyy tyypillisesti rinnakkaismuotoisen dataväylän avulla pääprossessoriin. MIL-STD-1553-standardi käyttää pääprossessorista ja sitä ympäröivästä elektroniikasta nimitystä alijärjestelmä (subsystem). Toisinaan sekä väylätoiminnallisuus että prosessointi on integroitu samalle piirille; tällaiset toteutukset ovat yleisiä ohjelmoitavilla FPGA-piireillä (Field Programmable Gate Array). Väyläprossessorin ja pääprossessorin välinen työnjako voi vaihdella suurestikin, mutta nykyisin monet väyläohjaimet prosessoivat viesti kerrallaan pääprossessorin antamia tehtäviä. Kehittyneimmissä väyläohjaimissa pääprossessori antaa joukon tehtäviä väyläprossessorin suoritettavaksi, jolloin pääprossessorin resursseja säästyy. [14, s. 15]

2.2.2 Etäterminaali

MIL-STD-1553-väylän yleisimpiä väylälaitteita ovat etäterminaalit, joita voi olla väylällä enintään 31 kappaletta. Standardin mukaan osoitealue on viisibittinen ja viimeinen osoite on varattu yleislähetykselle (broadcast). Etäterminaalin tehtävänä on toimia MIL-STD-1553:a ja alijärjestelmää yhdistävänä laitteena, mutta nykyisin lähes poikkeuksetta etäterminaali ja alijärjestelmä ovat samaa kokonaisuutta. Tyypillisiä etäterminaaliin liittyviä alijärjestelmiä ovat esimerkiksi GPS-vastaanotin, inertiaalipaikannusyksikkö ja radiolaitte. Yksinkertaisimmillaan alijärjestelmän tuottamat signaalit voivat olla yksittäisiä analogisia tai digitaalisia signaaleja antureilta. [14, s. 12]

Vaikka etäterminaali usein onkin huomattavasti väyläohjainta yksinkertaisempi laite, MIL-STD-1553 asettaa sille lukuisia vaatimuksia. Etäterminaali saa ainoastaan vastata väyläohjaimen aloittamaan liikennöintiin, paitsi poikkeuksena se saa väyläohjaimen käskystä lähettää viestin toiselle etäterminaalille. Kaikkiin väyläohjaimen etäterminaalille osoittamiin oikeellisiin viesteihin tulee vastata, pois lukien yleislähetysviestit. MIL-STD-1553B-standardi vaatii, että etäterminaalin tulee aloittaa vies-

tiin vastaaminen 4 – 12 μs :n sisällä vastaanotosta ja että vastausviestin lähetyksen viivästyessä yli 14 μs väyläohjaimen tulee hylätä se. [14, s. 12 – 13]

2.2.3 Väylämonitori

Väylämonitori on MIL-STD-1553:n aktiivilaite, joka kuuntelee viestiliikennettä kuitenkin itse osallistumatta siihen. Standardi määrittelee tarkoin, miten väylämonitoria tulee käyttää. Sallittuja käyttökohteita ovat väyläliikenteen tallennus diagnostiikkaa varten ja varaväyläohjaimena toimiminen. Normaalitytilanteessa varaväyläohjain kuuntelee liikennettä väylämonitoritilassa, jotta se voisi varsinaisen väyläohjaimen vikaannuttua jatkaa keskeytyksettä. [16, s. 76]

Usein väylämonitorin kanssa samassa laitteessa on myös etäterminaali, ja tyypillisesti nämä toiminnot on integroitu toisiinsa. Osoitteellisen väylämonitorin etuna on se, että väyläohjain voi säännöllisesti tarkistaa väylämonitorin toimivan normaalisti. Esimerkiksi kahdennetun väyläohjaimen tapauksessa tällä tavoin havaittaisiin varalaitteen vikaantuminen. [14, s. 16]

2.2.4 Passiiviset komponentit

MIL-STD-1553-väylän passiivisista komponenteista haaroittimet ja terminaattorit ovat yleisimmät, sillä ne ovat käytännössä jokaisessa järjestelmässä välttämättömiä. Haaroittimien avulla aktiiviset väylälaitteet liittyvät väylälle. Yksinkertaisin suoraan kytketyn väylän haaroitin on niin sanottu T- tai Y-adapteri. Muuntajakytketyn väylän haaroittimessa on integroituna isolaativastukset sekä erotusmuuntaja. [14, s. 10]

Terminaattorit ovat kaapelin ominaisimpedanssin mukaisia vastuksia, jotka on sijoitettu kunkin väyläkaapelin molempiin päihin. Standardin mukaan terminaattorien impedanssi saa poiketa enintään $\pm 2\%$ kaapelin ominaisimpedanssista [59, k. 4.5.1.4]. Terminaattorien avulla väyläkaapelista tulee sovitettu siirtolinja, jossa ei ideaalisesti tapahdu signaalin heijastuksia eikä siten säröä.

2.3 Väylärakenne ja kaapelointi

Standardin mukaan kaapelointi tulee tehdä suojatulla ja kierretyllä parikaapelilla, jonka impedanssi on 1 MHz:n testitaajuudella 70 – 80 Ω . Käytännössä ominai-

simpedanssi on vakiintunut 78 ohmiin. Lisäksi kaapelin tehovaimennus 30 metrin matkalla saa olla enintään 1,5 dB ja johdinkapasitanssin alle 98 pF metriltä [59, k. 4.5.1.1]. Standardin ensimmäisessä versiossa väylän pituus oli rajoitettu 100 metriin. MIL-STD-1553:n B-versiossa ei ole kuitenkaan mainintaa väyläkaapelin enimmäispituudesta, joten se määräytyy käytännössä kaapelin kapasitanssin ja siirtoviiveiden myötä. Käytännön sovelluksissa väylän pituus voi olla enintään muutamia satoja metrejä. [14, s. 10]

Ideaalitilanteessa väylä on siirtolinja, jossa ei ole epäsovitusta aiheuttavia haaroituksia. Aktiivilaitteet tulee kuitenkin kytkeä väylälle haaroittimien avulla, josta aiheutuu välttämättä signaaliin heijastuksia. MIL-STD-1553-standardi mahdollistaa aktiivilaitteiden liittymisen väylälle kahdella eri tavalla: suoraan tai muuntajan kautta. Suoraan kytketyn laitteen tapauksessa väylä haarautuu enintään 305 mm pitkällä kaapelilla laitteeseen päin. Muuntajakytketyssä laitteessa haaroitin sisältää 56 ohmin isolaatiovastukset sekä erotusmuuntajan, jolloin väylälaitteen ja haaroittimen välinen etäisyys voi olla enintään 6,1 metriä. Suoraan kytketyn laitteen tulee siis olla aivan väylän vieressä, joten muuntajakytketyn laitteen sijoittaminen on helpompaa. Lisäksi muuntajakytketyssä väylässä epäsovituksesta aiheutuvat heijastukset ovat pienempiä, jonka vuoksi MIL-STD-1553B Notice 2 -dokumentti ei suosittele suoraan kytkettyjä haaroittimia käytettäväksi ollenkaan [60, k. 10.5]. Yhdysvaltain ilmavoimien ja NATO-maiden avioniikassa nykyisin ainoastaan muuntajakytketyt haaroittimet ovat sallittuja. [14, s. 10 – 12]

MIL-STD-1553B ei määrittele väylässä käytettävää liittintyyppiä, mutta varsin yleisiä triaksiaaliliittimiä käytettäessä Notice 2 -dokumentti määrää keskimmäisen kontaktin positiiviseksi ja tätä ympäröivän kontaktin negatiiviseksi [60, k. 30.10.3]. Muita yleisesti käytettäviä liittintyypejä ovat D-SUB ja MIL-DTL-38999 [32].

2.4 Sähköinen toteutus

Toteutukseltaan MIL-STD-1553:n aktiiviset väylälaitteet eivät eroa juurikaan toisistaan. Kaikissa laitteissa olevan signaali- ja muuntajan jälkeinen komponentti on lähetin-vastaanotinpiiri, joka sovittaa väyläsignaalit logiikkatasoisiksi. MIL-STD-1553:n Manchester-koodattu signaali avataan ennen ylemmän tason logiikan käsittelyä ja vastaavasti lähetettäessä signaali koodataan. Manchester-koodauksen tarkoituksena on saada kello- ja datasignaalit samaan väylään ja toisaalta pois-

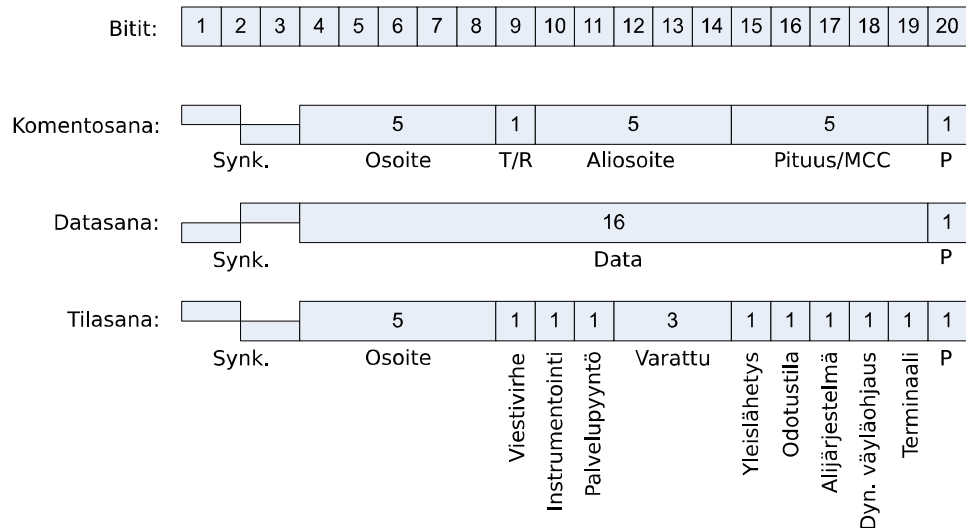
taa signaloinnista tasavirtakomponentti, joka ei mene signaali muuntajan läpi. MIL-STD-1553 on itsesynkronoituva, joten nimellisen 1 MHz:n kellotaajuuden ei tarvitse olla erityisen tarkka; standardissa pitkän ajan vaihteluväli on $\pm 0,1\%$. Lähettimen ulostulojännitteen jännite voi vaihdella välillä 18 – 27 Vpp, mutta väylällä jännitetasot ovat huomattavasti pienemmät. [59]

Manchester-koodauksen vuoksi jokainen bitti vastaa yhtä signaalin polariteetin muutosta, jolloin 1 MHz:n kellotaajuudella yhden bitin kesto on 1 μ s [59, k. 4.3.3.3]. Looginen nolla tarkoittaa signaalin siirtymää negatiivisesta positiiviseen ja loogisella ykkösellä päinvastoin. MIL-STD-1553:n signaloinnissa jännitetasoissa ei siis ole merkitystä, vaan ainoastaan nollapisteen ylityksillä [14, s. 20].

Manchester-koodauksen jälkeinen toiminta riippuu paljolti terminaalien toteutuksesta. Perinteisessä terminaalissa väylältä vastaanotettavat 16-bittiset sanat kirjoitetaan siirtorekistereihin ja lähetettäessä toisien siirtorekisterien sisältö kirjoitetaan Manchester-kooderin kautta väylälle. Moderneissa MIL-STD-1553-toteutuksissa lähes kaikki ajoituksiin ja protokollaan liittyvät toiminnot on integroitu samalle piirille [14, s. 17]. Liityntä alijärjestelmään on tyypillisesti rinnakkaismuotoinen dataväylä tai aivan uusimmissa piireissä sarjamuotoinen SPI-väylä (Serial Peripheral Interface) [24].

2.5 Protokollan sanatyypit

MIL-STD-1553 määrittelee kolme erilaista sanaa, joista viestit muodostuvat. Protokollan määrittelemät sanat ovat komentosana (command word), datasana (data word) ja tilasana (status word). Sanojen todellinen pituus on 20 bittiä, mutta näistä kolme bittiä on synkronointia ja yksi bitti pariteettitarkistusta varten. Käytännössä yksi sana voi siis siirtää 16 bitin verran tietoa. Jokainen sana alkaa kolme bittiä leveällä synkronointikoodilla, joka on datasanan osalta käänteinen. Komento- ja tilasanoja ei ole eroteltu toisistaan yksiselitteisesti, sillä komentosanan voi lähettää ainoastaan väyläohjain ja tilasan ainoastaan etäterminaali. Synkronointikoodin avulla vastaanotin tahdistaa itsensä vastaanottoa varten. Protokollan sanatyypit on esitetty kuvassa 2.2. [14, s. 19]



Kuva 2.2: MIL-STD-1553:n sanatyypit

2.5.1 Komentosana

Komentosana on aktiivisen väyläohjaimen lähettämä viestin aloitussana, joka yksilöi kohteena olevan etäterminaalin ja halutun toiminnon. Kolmebittisen synkronointikoodin jälkeiset viisi bittiä ovat etäterminaalin väyläosoitetta (terminal address), ja kuudes T/R-bitti kertoo lähetettävän datan suunnan. Seuraavat viisi bittiä määrittävät aliosoitteen (subaddress/mode), jonka sisältämä data on toiminnon kohteena. Sanan päättävää pariteettibittiä edeltävät viisi bittiä kertovat siirrettävien datasanojen määrän tai vaihtoehtoisesti moodikoodin, jolloin aliosoittebittien tulee olla joko *00000b* tai *11111b*. Moodikoodit käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.6.4. [14, s. 21 – 22]

2.5.2 Datasana

Datasana alkaa kolme bittiä leveällä synkronointikoodilla, joka on käänteinen komentosanan synkronointikoodiin verrattuna. Sekä väyläohjain että etäterminaali voivat lähettää datasanoja, toisin kuin muita sanatyyppejä. Synkronointikoodin jälkeiset 16 bittiä ovat vapaasti määriteltävää hyötydataa, jonka merkitevin bitti on ensimmäisenä. Viimeinen bitti on pariteettitarkistusta varten. [14, s. 23]

2.5.3 Tilasana

Etäterminaali vastaa väyläohjaimen pyyntöön tilasanalla, ellei kyseessä ole yleislähetys, jolloin kaikki väylällä olevat laitteet ovat viestin vastaanottajia. Tilasanan tarkoituksena on varmistaa, että etäterminaalin kanssa tapahtunut kommunikaatio on onnistunut. Mikäli väyläohjain ei saa pyyntöönsä vastauksena tilasanaa, se tyypillisesti yrittää kommunikaatiota uudestaan toisella kanavalla. [14, s. 23]

Tilasanan synkronointikoodin jälkeiset viisi bittiä kertovat vastaavan etäterminaalin osoitteen, jonka tulee olla sama kuin edeltävässä komentosanassakin. Mikäli kommunikaatiossa ilmenee virhe, etäterminaali asettaa seuraavan viestivirhebitin (message error) aktiiviseksi. Toiseksi viimeinen bitti (terminal flag) ilmaisee etäterminaalin vikaantumisen. Edellä mainitut tilasanan bitit on määritelty jo MIL-STD-1553:n ensimmäisessä versiossa. MIL-STD-1553B:n myötä loput tilasanan biteistä on määritelty kuvan 2.2 osoittamalla tavalla. Muiden sanatyyppejen tavoin viimein bitti on pariteettitarkistusta varten. [14, s. 23 – 27]

2.6 Protokollan viestityypit

Väylällä tapahtuvan kommunikaation perustana ovat viestit, jotka koostuvat yhdestä tai useammasta kappaleesta 2.5 määritellystä sanasta. MIL-STD-1553 määrittelee kymmenen erilaista viestityyppiä, joista neljä on yleislähetyksille. [14, s. 29]

2.6.1 Tiedonsiirto väyläohjaimelta etäterminaalille (BCRT-viesti)

BCRT-viestissä väyläohjain siirtää 1 – 32 datasanaa etäterminaalille, joka kuittaa siirron tilasanalla. Kommentosan TR-bitti ilmaisee siirron suunnan etäterminaalin kannalta, jolloin BCRT-viestissä bitin arvo on looginen '0'. MIL-STD-1553B-standardin mukaan etäterminaaliin kuuluvan alijärjestelmän tulee prosessoida vastaanotettu data enintään 56 μ s:n aikana, jotta se olisi valmis vastaanottamaan seuraavan viestin väyläohjaimelta. Viestin validoinnin tulee tapahtua enintään 12 μ s:n aikana. [14, s. 31]

2.6.2 Tiedonsiirto etäterminaalilta väyläohjaimelle (RTBC-viesti)

RTBC-viestissä väyläohjain pyytää etäterminaalia lähettämään 1 – 32 datasanan verran tietoa. Etäterminaalilta väyläohjaimelle tapahtuvassa tiedonsiirrossa komen-

tosanan TR-bitin looginen arvo on '1'. Alijärjestelmän tulee siirtää data etäterminaalin lähetettäväksi 12 μ s:n sisällä komentosanan vastaanottamisesta tai tiedonsiirto hylätään. [14, s. 31]

2.6.3 Tiedonsiirto etäterminaalilta toiselle (RTRT-viesti)

Tiedonsiirto etäterminaalilta toiselle tapahtuu RTRT-viestillä, johon osallistuu muista viestityypeistä poiketen kolme aktiivilaitetta. RTRT-viestillä voidaan siirtää tietoa kahden etäterminaalin välillä ilman, että tieto kiertää väyläohjaimen kautta. RTRT-viesti siis korvaa peräkkäiset BCRT- ja RTBC-viestit. [14]

RTRT-kommunikaatio tapahtuu monivaiheisesti, ja se on huomattavasti etäterminaalin ja väyläohjaimen välistä kommunikaatiota monimutkaisempaa. Aluksi väyläohjain lähettää vastaanottavalle etäterminaalille komentosanan, ja välittömästi tämän jälkeen myös lähettävälle etäterminaalille komentosanan. Vastaanottava etäterminaali jää odottamaan datasanaa komentosanan jälkeen, mutta se vastaanottaakin toiselle etäterminaalille tarkoitetun komentosanan. Tämä komentosana hylätään ja vastaanottava etäterminaali jää edelleen odottamaan datasanaa. Lähettävä etäterminaali reagoi väyläohjaimen komentosanaan RTBC-viestin tavoin ja lähettää tilasan lisäksi halutut datasanat. Vastaanottava etäterminaali hylkää jälleen tilasan, mutta vastaanottaa datasanat. Onnistuneen vastaanoton jälkeen etäterminaali lähettää väyläohjaimelle tilasan kuittauksena. [14, s. 31 – 32]

2.6.4 Moodikomentoviestit (MCC-viestit)

MIL-STD-1553:n yleisin käyttökohde on tiedonsiirto aktiivisten laitteiden välillä. Joissain tapauksissa voi olla kuitenkin tarvetta lähettää etäterminaaleille yksinkertaisia käskyjä, niin sanottuja moodikomentoja. Standardin uusimmassa versiossa on määritelty yksityiskohtaisesti sallitut moodikomennot ja niiden kuvaukset. Tavallisia moodikomentoviestejä on kolme erilaista: pelkkä moodikomento, moodikomento etäterminaalille lähetettävällä datasanalla ja moodikomento väyläohjaimelle lähetettävällä datasanalla. [14, s. 39]

Standardin B-versio määrittelee 15 moodikomentoa, joiden toteutus väylälaitteissa on vapaaehtoista. MIL-STD-1553-pohjaisissa järjestelmissä usein sovellettava Notice

2 -dokumentti kuitenkin vaatii jokaiseen etäterminaaliin toteuttavan neljä moodikoodia, jotka ovat tilasanan lähettäminen (*00010b*), väylälähettimen sammuttaminen (*00100b*), väylälähettimen aktivoiminen (*00101b*) ja etäterminaalin alustaminen (*01000b*). [60, k. 30.4.2]

2.6.5 Yleislähetysviestit

Yleislähetysviesteillä väyläohjain voi lähettää tietoa ja komentoja yksilöimättä vastaanottajaa. Yleislähetysviesteissä etäterminaalin osoitteena on *11111b*, jolloin etäterminaalit käsittelevät viestit kuitenkin vastaamatta niihin. MIL-STD-1553-toteutuksissa yleislähetysviestejä käsitellään erillisinä viestityypeinä, jolloin ne voidaan tarvittaessa estää. Yleislähetys on mahdollista BCRT- ja RTRT-tyyppisille viesteille sekä kahdelle moodikomentoviestityypille. [14, s. 33]

Standardin eri versioissa ja lisäyksissä yleislähetysviestien käyttäminen on vuoroin varoituksin sallittua ja vuoroin kokonaan kiellettyä. Yleislähetysten ongelmana on se, ettei viestien perillemeno voida yksinkertaisesti varmistaa. Lisäksi yleislähetysten katsotaan rikkovan MIL-STD-1553:n kysely-vastausluonnetta. MIL-STD-1553B ei suosittele yleislähetysten käyttämistä, mutta ne ovat täydessä laajuudessa sallittuja [59, k. 10.6]. Yhdysvaltain ilmavoimien käyttöön tarkoitettu MIL-STD-1553 Notice 1 -dokumentti kieltää yleislähetysten käytön, mutta niiden toteutus laitteisiin on sallittua [61, k. 50.4.4.1]. Notice 2 -dokumentti puolestaan sallii yleislähetysten käytön ainoastaan moodikomentoviesteissä [61, k. 50.4.4.2].

2.7 Toteutusvaihtoehdot

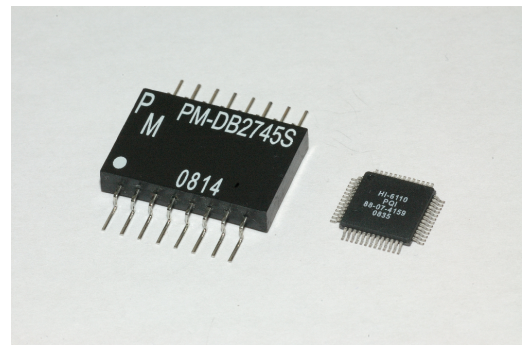
Markkinoilla on lukuisia integroitua piirejä ja hybridejä, joilla voidaan toteuttaa MIL-STD-1553-terminaali. Moderneimmissa piireissä on integroitu signaalimuuntaaja lukuun ottamatta kaikki samaan koteloon, ja piiri voi toimia kaikissa kolmessa toimintatilassa joko väyläohjaimena, etäterminaalina tai väylämonitorina. Kommunikaatio alijärjestelmän kanssa tapahtuu usein rinnakkaismuotoisella väylällä, jolloin väyläpiiri on tyypillisesti osa alijärjestelmän muistialuetta [23]. Aivan uusimmat väyläpiirit kommunikoivat alijärjestelmän kanssa sarjamuotoisen SPI-liitännän (Serial Peripheral Interface) kautta, jolloin yksinkertaisten etäterminaalien toteutus helpottuu ja piirilevy-pinta-ala pienenee entisestään [24]. Integroitujen ratkaisujen

etuina ovat usein ainoastaan yhden käyttöjännitteen tarve ja diskreettiä toteutusta oleellisesti pienempi tehonkulutus.

MIL-STD-1553:n terminaali on perinteisesti toteutettu erillisellä lähetin-vastaanotinpiirillä ja viestiprosessorilla. Tällöin viestiprosessorin generoima logiikkatasoinen väyläliikenne puskuroidaan lähetin-vastaanotinpiirissä MIL-STD-1553:n signaalitasojen mukaiseksi, ja sama tapahtuu päinvastoin viestiprosessorin vastaanottaessa tietoa väylältä. 80- ja 90-luvuilla kehitetyissä viestiprosessoreissa alijärjestelmän osuus väyläliikenteen toteuttamisessa on nykyisiä suurempi, sillä viestiprosessorit usein välittivät vain yksittäisiä sanoja eikä niissä ollut FIFO-tyyppisiä (First In, First Out) muisteja. Yksinkertaisimmat viestiprosessorit vaativat usein ulkoisia muisteja, rekistereitä ja muuta erillislogiikkaa, jotta ne voitaisiin ohjelmiston kannalta järkevästi liittää alijärjestelmiin [31]. Perinteiset MIL-STD-1553-väylän lähetin-vastaanotinpiirit vaativat kolme erillistä käyttöjännitettä: tyypillisesti 5 V logiikalle ja ± 12 V signaalimuuntajan ohjaamiseen. Useista käyttöjännitteistä, kompleksisemmasta toteutuksesta ja suuremmasta piirilevyypinta-alasta huolimatta erillisen lähetin-vastaanotinpiirin ja viestiprosessorin MIL-STD-1553-toteutukset ovat edelleen jossain määrin yleisiä – erityisesti kriittisimmissä laitteissa.



(a)



(b)

Kuva 2.3: Kuvassa A on 1980-luvulta Marconin lähetin-vastaanotinpiiri MCT1589 ja etäterminaalipiiri MA805. Viereisessä kuvassa B on esitetty nykyaikainen integroitu viestiprosessori (Holt HI-6110) sekä pintaliitettävä MIL-STD-1553-muuntaja (Premier Magnetics PM-DB2745S).

Kolmas jokseenkin yleinen toteutustapa on käyttää ohjelmoitavia logiikkapiirejä väyläviestien generointiin ja prosessointiin, jolloin kyseessä on ohjelmallisesti konfiguroitava viestiprosessori. Tällöin MIL-STD-1553:n fyysinen väyläliityntä tapahtuu erillisellä lähetin-vastaanotinpiirillä, joka liittyy esimerkiksi FPGA-piiriin logiikkatasoisilla signaaleilla. Ohjelmoitavaan logiikkapiiriin perustuvan toteutuksen etuina

ovat komponenttien edullinen hinta, lähes rajoittamaton muunneltavuus ja toteutuksen yksinkertaisuus [49]. Oman MIL-STD-1553-toteutuksen kehittäminen ohjelmoitaville logiikkapiireille on tosin kallista ja aikaa vievää, ja niinpä markkinoilla onkin muutamia valmiita kaupallisia toteutuksia (Intellectual Property, IP) [49]. FPGA-pohjaisia väylätoteutuksia hyödynnetään muun muassa avaruustekniikassa, koska ionisoivaa säteilyä kestävien MIL-STD-1553-piirien tarjonta on vähäistä ja ohjelmoitavia logiikkapiirejä käyttämällä vaikeammin validoitavan ohjelmiston osuus saadaan pidettyä pienempänä.

2.8 Rajoitteet

Vaikka MIL-STD-1553 on edelleen monin osin teknisesti ylivertainen, muutamat seikat rajoittavat sen soveltamista erinäisiin järjestelmiin. Tiettyjen teknisten rajoitteiden lisäksi viestisenssiongelmat ja komponenttien korkea hinta haittaavat väyläteknologian hyödyntämistä.

2.8.1 Tekniset rajoitteet

Standardin julkaisun aikoihin se edusti kehityksen huippua. 1970-luvun puolivälissä mikroprosessorien kellotaajuudet olivat enimmillään muutamia megahertsejä, jolloin samaan aikaan MIL-STD-1553:n bittinopeus oli tietokoneiden kellotaajuuksien luokka – 1 MHz eli 1 Mb/s. Vuosien saatossa MIL-STD-1553 on jäänyt bittinopeuksilla vertailtuna monen muun teknologian taakse, josta tunnetuimpana esimerkkinä jo 10 Gb/s -nopeuksiin pääsevä Ethernet. Standardin vuonna 1978 julkaistussa B-versiossa todetaan, ettei MIL-STD-1553:sta tule käyttää videokuvan, äänen tai muiden suurten tietomassojen siirtoon [59, k. 10.3].

Laaajoissa järjestelmissä MIL-STD-1553:n etäterminaalien määrän rajoittuminen enintään 31:teen voi tuottaa ylimääräisiä hankaluuksia. Sähköisten seikkojen osalta laitteiden määrä voisi olla suurempikin, mutta toisaalta haaroittimien määrä vaikuttaa väyläsignaalin laatuun. Käytännön sovelluksissa rajoite on ohitettu käyttämällä useita erillisiä väyliä, jotka liittyvät toisiinsa joko yhteisen väyläohjaimen tai siltalaitteen avulla. Väylän jakaminen voi olla perusteltua myös luotettavuuden ja kaapelointityön helpottamisen vuoksi. Lentokoneissa kriittisimmät ohjaus- ja navigointilaitteet ovat tyypillisesti erillään esimerkiksi radiolaitteista [61, k. 70.2.2.1].

Protokollan osalta monimutkaisemmissa etäterminaaleissa rajoitteiksi muodostuvat aliosoitteiden vähäinen määrä (30 kappaletta) ja viestin enimmäispituus (64 tavua). MIL-HDBK-1553A tarjoaa kuitenkin useita standardinmukaisia tapoja kiertää tämä rajoite. Yksi vaihtoehto on vaihtaa datasanan sisältävällä moodikomennolla aliosoitteiden muistialue, ja toinen sovellusoppaan mainitsema tapa on dynaamisten aliosoitteiden käyttäminen. Tällä tarkoitetaan sitä, että joko tietyillä aliosoitteilla tai datasanoilla vaikutetaan muiden aliosoitteiden sisältämään tietoon. [61, k. 60.3.3.2]

2.8.2 Muut rajoitteet

MIL-STD-1553:n soveltamista teollisuusympäristöön haittaa jossain määrin Yhdysvaltain puolustusvälineiden vientiä ja tuontia rajoittava lakikokoelma, ITAR (International Traffic in Arms Regulations). Osa markkinoilla olevista MIL-STD-1553-komponenteista on vientirajoitelistalla, jota ITAR koskee. Käytännössä tuotteen joutuminen ITAR:n alle merkitsee sitä, että sen myyminen Yhdysvaltojen ulkopuolelle vaatii valtiorhallinnolta vientiluvan ja hanke voi saada poliittisen luonteen [62]. Valtaosa MIL-STD-1553-komponenteista valmistetaan Yhdysvalloissa, ja erityisesti MIL-STD-1553:een liittyvistä mikropiireistä merkittävä osa on ITAR:n vaikutuspiirissä. Markkinoilla on kuitenkin ITAR-vapaita yhdysvaltalaisia komponentteja sekä muutamia Euroopassa valmistettuja tuotteita [22, 11, 15]. Yleisesti ottaen vientisäädökset eivät merkittävästi rajoita MIL-STD-1553:n käyttämistä.

Korkean luotettavuuden avioniikalla ja sotilastekniikalla on usein hyvin rajalliset markkinat, joiden ominaispiirteinä ovat pienuuden lisäksi sykisyys. Tuotteita valmistetaan tilausten perusteella eikä jatkuvaa kysyntää ole. Siten pitkästä historiasta huolimatta MIL-STD-1553:n laitekanta on oleellisesti yleisimpiä teollisuusväylästandardeja pienempi. Näiden seikkojen vuoksi MIL-STD-1553-komponenttien hinnat ovat varsin korkeat, koska suuret tuotekehityskulut on hinnoiteltu verrattain pieniin valmistusmääriin. Nykyisellä hintatasolla yksittäisen väyläliittymän toteuttaa valmiilla piireillä edullisimmillaan noin 300 eurolla, joka on useimpia teollisuussovelluksia ajatellen liian paljon.

MIL-STD-1553:n väyläpiirit eivät ole erityisen monimutkaisia. Esimerkiksi monta kertaluokkaa edullisemmat Ethernet-piirit ovat huomattavasti kompleksisempia, joten tuotantomäärien kasvaessa komponenttien hinnat todennäköisesti laskisivat muiden väyläpiirien tasolle. Pienemmällä tuotantomäärillä väylätoteutuksen hintaa las-

kisi myös se, jos spesifisten MIL-STD-1553-piirien asemesta käytettäisiin ohjelmallisesti konfiguroitavia FPGA-piirejä. Mikäli väylästandardi otettaisiin yleisesti käyttöön teollisuussovelluksissa, teknologian hinta ei siis olisi este.

3. TURVA-AUTOMAATIO

3.1 Turva-automaatio käsitteenä

Nykyaikaisessa teollisessa tuotannossa prosessien, koneiden ja yksittäisten laitteiden riskejä voidaan vähentää monin tavoin, mutta ensisijaisesti tämä tapahtuu huolellisella suunnittelulla. Normaalista käyttöautomaatiosta erillinen turva-automaatiojärjestelmä on yksi merkittävä keino riskien vähentämisessä. Turva-automaation tehtävänä on vika- tai vaaratilanteessa pysäyttää prosessi ja ohjata se turvalliseen tilaan. Normaalisti turva-automaatiolla ei siis ole osuutta järjestelmän toimintaan, mutta käyttöautomaation pettäessä sillä on merkittävä rooli ympäristön, ihmisten terveyden ja omaisuuden turvaamisessa. Turva-automaation tulee olla ehdottoman luotettavaa, sillä sen virheellisestä toiminnasta voi seurata vakavia vahinkoja. [58, s. 4 – 5]

Automaatiojärjestelmät ovat monimutkaistuneet viime vuosikymmeninä merkittävin harppauksin. Perinteisesti jokainen yksittäinen anturi ja toimilaite kaapeloitiin erillisillä johdinvedoilla järjestelmää ohjaavaan logiikkaan tai myöhemmin vuosina tietokoneeseen. Useiden tuhansien mittaus- ja ohjaussignaalien tapauksessa järjestelmän suunnittelu, toteutus ja ylläpito muodostuivat hankaliksi. 1990-luvun digitalisoituminen kosketi myös vuosikymmeniä analogiatekniikkaan turvautunutta teollisuutta, ja pian kaikki automaatiojärjestelmien signaalit siirtyivät kulkemaan digitaalisiin kenttäväyliin. Aivan kuten käyttöautomaationkin tapauksessa, myös turva-automaatio on vaikeasti hallittavissa ilman hierarkkista ja hajautettua kenttäväylää. Tämän vuoksi viimeisen vuosikymmenen aikana on ilmaantunut lukuisia vaihtoehtoja turva-automaatioon tarkoitetuille digitaalisille kenttäväylille – eli turvaväylille. [52, s. 28]

3.2 Toiminnallinen turvallisuus

3.2.1 Toiminnallisen turvallisuuden malli

Automaatiojärjestelmän turvallisuus on monen tekijän summa. Laitteiston ja ohjelmiston lisäksi kokonaisturvallisuuteen vaikuttavat muun muassa suunnitteluperiaatteet, ylläpito, dokumentoinnin laatu ja yleiset toimintatavat. Toiminnallisen turvallisuuden malli on osoittautunut hyödylliseksi monimutkaisten järjestelmien turvallisuussuunnittelussa. Malli perustuu elinkaariajatteluun, jossa järjestelmän jokainen vaihe suunnittelusta aina käytöstä poistoon asti on määritelty. Toiminnallisella turvallisuudella tarkoitetaan siis kaikkia niitä osia kokonaisturvallisuudesta, joka riippuu järjestelmien ja laitteiden oikeasta toiminnasta [58, s. 4]. Sen tarkoituksena on estää järjestelmää tekemästä ei-toivottuja toimintoja sekä varmistaa, että automaatiojärjestelmä toimii turvallisuusvaatimusten mukaisesti. Jokaisen turvallisuuteen liittyvän yksittäisen toiminnon luotettavuus on oltava vaadittavalla tasolla, jotta järjestelmän toiminnallinen turvallisuus olisi varmistettu. Toiminnallisen turvallisuuden riittävä taso määritellään kohteen riskiarvioinnilla. "Turvatoiminnon saavuttamaa luotettavuutta voidaan arvioida määrällisesti turvatoiminnon menettämisen suurimmalla sallitulla todennäköisyydellä. Mitä suurempi on turvatoiminnon osuus riskin pienentämisessä, sitä pienemmällä todennäköisyydellä turvatoiminnon saa menettää ja sitä suuremmat ovat turvatoiminnon toteutumiselle asetettavat vaatimukset." [52, s. 13]

Kansainvälisessä IEC 61508 -perusstandardissa esitetään vaatimuksia ja ohjeita sähköisten, elektronisten ja ohjelmoitavien automaatiojärjestelmien toiminnallisen turvallisuuden elinkaaren eri vaiheille [52, s. 17]. Standardi on jaettu seitsemään osaan, joista IEC 61508-2 määrittelee laitteiston ja IEC 61508-3 ohjelmiston turvallisuusvaatimukset. Standardin ensimmäisessä osassa esitetty turvajärjestelmien yleiset vaatimukset. [25, s. 7]

3.2.2 Turvallisuuden eheystaso

Nykyään kaikki turvallisuutta koskevat standardit perustuvat edellä kuvattuun toiminnallisen turvallisuuden käsitteeseen ja IEC 61508 -standardiin. Järjestelmälle tehtävän riskianalyysin perusteella turvatoiminnoille asetetaan suorituskyyvaatimukset, jotka määritellään IEC 61508:ssa sekä sen sovellusstandardeissa turvallisuuden eheystason (Safety Integrity Level, SIL) avulla [52, s. 17]. Standardi jakaa

järjestelmään kohdennetut turvallisuusvaatimukset "harvojen vaateiden toimintatapaan" ja "tiheiden vaateiden tai jatkuvan toiminnan toimintatapaan", joilla on omat vaatimustasonsa. Nämä vaatimustasot on esitetty taulukoissa 3.1 ja 3.2. [25, s. 27]

Taulukko 3.1: Turvallisuuden eheystasot – harvojen vaateiden toimintatavan tavoitteelliset vikaantumismitat [25, s. 28]

Turvallisuuden eheystaso	Keskimääräinen vian todennäköisyys
SIL4	$\geq 10^{-5} \dots < 10^{-4}$
SIL3	$\geq 10^{-4} \dots < 10^{-3}$
SIL2	$\geq 10^{-5} \dots < 10^{-2}$
SIL1	$\geq 10^{-2} \dots < 10^{-1}$

Taulukko 3.2: Turvallisuuden eheystasot – tiheyden vaateiden tai jatkuvan toiminnan toimintatavan tavoitteelliset vikaantumismitat [25, s. 28]

Turvallisuuden eheystaso	Vaarallisen vian todennäköisyys tuntia kohden
SIL4	$\geq 10^{-9} \dots < 10^{-8}$
SIL3	$\geq 10^{-8} \dots < 10^{-7}$
SIL2	$\geq 10^{-7} \dots < 10^{-6}$
SIL1	$\geq 10^{-6} \dots < 10^{-5}$

Vikaantumismittojen lisäksi turvallisuuden eheystasoon vaikuttavat standardin toisessa osassa määritellyt laitteistovaatimukset sekä kolmannen osan ohjelmistovaatimukset. IEC 61508-2 jakaa turvalaitteet A- ja B-tyyppeihin. Standardin mukaan A-tyypin laitteen kaikkien komponenttien vikaantumistilat tulee olla hyvin määriteltäviä, laitteen toiminnan vikatilanteessa tulee olla täysin tiedossa ja laitteen turvallisuustasosta tulee olla luotettavaa käytännön tietoa. Mikäli yksikään näistä vaatimuksista ei laitteen kohdalla täyty, kyseessä on B-tyypin laite. Laitteiston SIL-taso määräytyy edellä määritellyn tyypin ja turvallisten vikojen osamäärän (Safe Failure Fraction, SFF) perusteella. SFF-lukema määritetään monimutkaisilla vika- ja vaikutusanalyysillä, joita ei tässä työssä käsitellä tarkemmin [64]. Elektronisten turvalaitteiden tapauksessa laskennallinen turvallisten vikojen osamäärä on tyypillisesti yli 99 %, jolloin turvallisuuden eheystaso määräytyy taulukon 3.3 mukaan. Vikasietoisuuden ollessa tasolla *kaksoisredundanttinen* laitteiston tulee sietää kaikkia mahdollisia yksittäisiä virheitä, eli toisin sanoen sen tulee olla kaikin osin kahdennettu. Käsitteellä *kolmoisredundanttinen* tarkoitetaan sitä, että mitkä tahansa kaksi vikaa eivät vaikuta turvalaitteen toimintaan. Näiden vaatimusten vuoksi SIL4-luokan laitteet ovat käytännössä erittäin kalliita ja harvinaisia. [26, s. 24 – 28]

Taulukko 3.3: Turvallisuuden eheystasot laitteiston osalta ($SFF \geq 99\%$) [26, s.26]

Vikasietoisuus	Tyyppi A	Tyyppi B
normaali	SIL3	SIL3
kaksoisredundanttinen	SIL4	SIL4
kolmoisredundanttinen	SIL4	SIL4

Edellä kuvatuilla menetelmillä saatu turvalaitteiden SIL-taso ei ole välttämättä vielä lopullinen. IEC 61508-2:n liitteessä A olevissa taulukoissa on listattu useita yksittäisiä ominaisuuksia ja tekijöitä, joiden perusteella SIL-taso tarkentuu eli käytännössä joko alentuu tai pysyy samana. Taulukoiden turvallisuuden eheystasoon vaikuttavia kohtia ovat muun muassa ympäristölämpötilan tarkkailu, sähkömagneettisten häiriöiden sieto, virheellisten käyttöjännitteiden sieto sekä ohjelmakoodin suorituksen tarkkailu. [26, s. 47 – 60]

Ohjelmiston osalta turvalaitteen SIL-taso määräytyy laitteistoa monimutkaisemmin IEC 61508-3 -standardin liitteiden A ja B taulukoiden mukaisesti. Taulukon kohdat voivat olla *ei suositeltavia*, *neutraaleja*, *suositeltavia* tai *erittäin suositeltavia*, mutta pakollisia vaatimuksia ei varsinaisesti ole. Käytännössä *erittäin suositeltava* tarkoittaa vaatimusta, ellei kohdan ohittamiselle ole erityistä syytä. Turvallisuuden eheystason määrittäminen pelkkien taulukoiden perusteella ei ole riittävän yksiselitteistä, ja standardi kehottaakin tulkitsemaan ohjelmiston vaatimustaulukoita standardin kuudennen osan (IEC 61508-6) avulla. [27, s. 39 – 48]

Lopullinen turvallisuuden eheystaso on aina alin eri menetelmillä saaduista SIL-tasoista. Järjestelmän osalta yksittäinen turvatoiminto on turvallisuuden eheystasoltaan sama kuin sen yksittäisen komponentin SIL-taso, eli esimerkiksi SIL2-tasoon pyrittäessä ei voida käyttää SIL1-komponentteja [25, s. 28].

3.3 Turva-automaation vaatimuksia

Turva-automaatio on eräs tärkeimmistä riskinvähennyskeinoista automaatiojärjestelmissä. Käyttöautomaation vikaantuessa turva-automaatio pysäyttää prosessin tai laitteen ja ohjaa sen turvalliseen tilaan. Turva-automaation peruslähtökohta on varmistaa, että vaarallisista laitteista ja prosesseista ei aiheudu odotettavissa olevan elinkaaren aikana henkilö-, ympäristö- tai omaisuusvahinkoja. Tämän vuoksi turva-automaation tulee olla käyttöautomaatiosta riippumaton, ja vikatilanteen sattuessa

toimilaitteiden pitää jäädä tai siirtyä ennalta määritellyyn tilaan [58, s. 4]. Turvaväyliä tapauksessa turva- ja käyttöautomaation riippumattomuus ei tosin välttämättä aina täyty, sillä monet turvaväylät (esimerkiksi PROFIsafe ja DeviceNet Safety) toimivat samoissa väyläkaapeleissa käyttöautomaation kanssa. Tällöin laitteiden toiminnallinen erillisuus on kuitenkin varmistettu ja osoitettu [52, s. 24]. Lukuisista eduista huolimatta on kuitenkin kiistatonta, että esimerkiksi väyläkaapelointiin kohdistuva vika vaikuttaa tällöin käyttöautomaation lisäksi myös turva-automaatioon ja kriittisissä prosesseissa toiminnallinen turvallisuus voi vaarantua.

Automaatiojärjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon prosessin luonne ja potentiaaliset vaaratekijät, joiden perusteella toteutetaan kokonaisuuden kannalta riittävä turva-automaatio. Oikein suunnitellun turva-automaatiojärjestelmän on toimittava riittävän suurella todennäköisyydellä virheettömästi myös harvinaisissa ja epätodennäköisissä vaaratilanteissa. Turva-automaation tulee normaalitilanteissa toimia huomaamattomasti ja saumattomasti käyttöautomaation rinnalla, eikä se saa aiheuttaa prosessia tai turvallisuutta vaarantavia pysäytyksiä tai alasajoja. [58, s. 4]

Turva-automaatiokomponenttien ja niihin liittyvien teknologioiden, kuten turvaväylästandardien, tulee olla kohteeseen soveltuvia ja luotettavia. Lisäksi laitteiden tulee olla mahdollisimman huoltovapaita ja vikasietoisia. Valintaa tehdessä tulisi huomioida myös tuotteiden ja niiden tukipalveluiden saatavuus, tuotevalikoiman monipuolisuus sekä toisistaan riippumattomien valmistajien määrä. Turva-automaation tekniset vaatimukset ovat usein sovelluskohtaisia ja ne vaihtelevat paljon, mutta tyypillisiä vaatimuksia ovat reaaliaikaisuus sekä kattavat diagnostiikkaominaisuudet [52, s. 83 – 85]. Normaalitilanteissa turva-automaatiolla ei ole yleensä mitään aktiivista osuutta itse prosessiin eikä turvakomponenttien toimintaa voida siten havainnoida. Turva-automaation toimivuus on kyettävä osoittamaan esimerkiksi itsediagnostiikan ja säännöllisten testien avulla [58, s. 4].

Erinäisissä kansallisissa ja kansainvälisissä säädöksissä esitetään vaatimuksia turvallisuuteen liittyville laitteille ja järjestelmien toiminnalliselle turvallisuudelle. Elektronisten ohjausjärjestelmien turvallisuuden määrittelylle keskeisin yleisstandardi on IEC 61508, joka sisältää toiminnallisen turvallisuuden varmistamiseen liittyviä vaatimuksia ja yleisiä ohjeita. Eurooppalainen sähköalan standardoimisjärjestö CENELEC on vahvistanut sen myös eurooppalaiseksi EN 61508 -standardiksi. Yleisstandardin alla on olemassa toimiala- ja järjestelmäkohtaisia sovellusstandardeja, joita

ovat muun muassa prosessiteollisuudelle tarkoitettu IEC 61511 sekä koneturvallisuuden liittyvä IEC 62061. Turva-automaation suunnittelussa ja toteutuksessa tulisi noudattaa näiden standardien vaatimuksia. [58, s. 6]

3.4 Turvaväylät

3.4.1 Turvaväylät käsitteenä

Digitaaliset kenttäväylät mahdollistavat automaatiokomponenttien hajauttamisen lähemmäksi antureita ja toimilaitteita, jolloin järjestelmän tehokkuus ja hallittavuus paranevat. Erityisesti laajojen tai monimutkaisten automaatiojärjestelmien suunnittelussa ja toteutuksessa kenttäväylillä saavutetaan merkittäviä etuja, sillä niiden ansiosta järjestelmän rakenne selkeytyy, diagnostiikka helpottuu ja kaapeloinnin määrä pienenee. Kenttäväylien tarkoituksena on tiedon siirtäminen digitaalisesti ohjausjärjestelmän ja kenttälaitteen välillä. Kenttäväyliä voidaan käyttää hyvin monenlaisissa sovelluksissa, kuten prosessiohjauksissa, konejärjestelmissä, liikkuvissa työkoneissa ja kiinteistöautomaatiossa. [52, s. 28 – 30]

Turvaväylät ovat kenttäväylien eräs lajityyppi, jota käytetään laaja-alaisesti samoissa sovelluskohteissa kuin tavallisia kenttäväyliäkin. Sekä kenttäväylien että turvaväylien perustekniikka on usein samaa fyysistä väylätoteutusta myöten. Turvaväylällä voidaan tarkoittaa joko käyttöautomaatiosta täysin riippumatonta väylää tai olemassa olevaan kenttäväylään tehtyä turvalaajennusta, jolloin väylään voidaan liittää myös turvakomponentteja. Useimmat kaupalliset turvaväylät perustuvat aiemmin kehitettyihin kenttäväylästandardeihin, joita on muokattu turvallisuussovelluksiin sopiviksi tai joihin on lisätty turvatoiminnot mahdollistava protokollakerros. Yleisimmille turvaväylille ja niiden väylälaitteille on annettu IEC 61508 -standardin mukainen turvallisuuden eheystaso (SIL), jota on käsitelty kappaleessa 3.2.2. [52, s. 31]

3.4.2 Turvaväylien tekninen toteutus

Lähes kaikki kenttäväylät, ja siten myös turvaväylät, ovat yleisellä tasolla toimintaperiaatteeltaan samanlaisia: bittimuotoinen, digitaalinen tietoliikenne muodostetaan jännitteen tai virran vaihteluina tiettyjen määritelmien mukaisesti [52, s. 24]. Tyypillisesti kaikki väylälle kytketyt laitteet kykenevät sekä lähettämään että vastaanottamaan, jolloin yhden laitteen lähettäessä viestiä kaikki muut samassa väylässä olevat

laitteet vastaanottavat sitä. Väyläprotokolla on kokoelma määritelmiä ja sääntöjä, joiden avulla väylällä olevat laitteet voivat kommunikoida keskenään [52, s. 24]. Väylästandardi koostuu tyypillisesti useammasta protokollasta alkaen väylän sähköisten ominaisuuksien määrittelystä ohjelmistotason yksityiskohtiin asti. Näitä protokollia kuvataan usein seitsenkerroksisen OSI-viitemallin (Open Systems Interconnection) mukaisilla nimityksillä, joista kenttäväylien tapauksessa tarpeellisimmat ovat *1. fyysinen kerros*, *2. siirtoyhteyskerros* ja *7. sovelluskerros* [12].

Fyysisellä kerroksella määritellään protokollan tapa signaloida väylällä sekä bittitasolla kommunikaation rakenne. Lisäksi fyysiseen kerrokseen kuuluu usein myös siirtomedian eli käytännössä kaapeloinnin määrittely. Suurin osa turvaväylistä perustuu fyysiseltä toteutukseltaan joko CAN- tai RS-485-väyliin, joissa tietoa siirretään differentiaalisina jännitetasoina kierrettyssä parikaapelissa. Uusimmat Ethernet-pohjaiset turvaväylät pohjautuvat IEEE 802.3 -standardiin, jossa fyysisen kerroksen lisäksi määritellään toiminta myös siirtoyhteyskerroksella. [12]

Väylälaitteiden välinen matalan tason kommunikointi sekä virheiden havaitseminen (ja mahdollisesti korjaaminen) tapahtuvat tavallisesti siirtoyhteyskerroksella, mutta väylästandardista riippuen toimintojen jaottelu kahden alemman protokollakerroksen välillä vaihtelee. Siirtoyhteystasolla väyläviestit muodostuvat tyypillisesti pakeeteista, jotka ovat väylällä lähetettävän tiedon pienin yksikkö. Paketti sisältää yleensä lähde- ja kohdeosoitteen, tarkistussumman sekä varsinaisen hyötydatan. Yksinkertaisissa väylästandardeissa yksi viesti mahtuu yhteen pakettiin, mutta esimerkiksi CAN-pohjaisissa turvaväylissä viesti voi jakautua useampaan pakettiin.

Häiriöisessä teollisuusympäristössä väyläkommunikaatiossa voi tapahtua virheitä. Yksinkertaisin keino virheiden havaitsemiseen on laskea viestin joko '0'- tai '1'-bittien määrästä pariteettibitti, jonka avulla yhden bitin poikkeamat voidaan tunnistaa. Luotettavampi virheen havaitsemismenetelmä on syklinen redundanssitarkestus eli CRC (Cyclic Redundancy Check), jonka avulla havaitaan tehokkaasti myös suurempia bittivirheitä. CRC-tarkistussumman pituus vaikuttaa oleellisesti sen virheenpaljastuskykyyn. Kehittyneimmissä väylästandardeissa myös virheenkorjausominaisuus voi olla mahdollinen, mutta tällöin siirrettävän tiedon määrä kasvaa redundanssin vuoksi ja virheenkorjausalgoritmi vaatii yksinkertaista tarkistussummaa enemmän laskentakapasiteettia. [52, s. 26].

OSI-viitemallin ylimmän kerroksen, sovelluskerroksen, sisältö riippuu paljolti tarkasteltavan väylästandardin kompleksisuudesta eli siitä, onko alemmat kuljetus- ja verkkokerrokset määritetty. Turvaväyliä tapauksessa sovelluskerroksella kulkeva tieto on tyypillisesti tilatietoja, mittauksia ja ohjauskomentoja. Myös laitteiden välinen synkronointi voi tapahtua sovelluskerroksen protokollalla. [12]

3.4.3 Katsaus yleisimpiin turvaväyliin

Turvaväylät jakautuvat käyttöympäristön perusteella karkeasti kolmeen kategoriaan, jotka ovat yleiskäyttöiset turvaväylät, prosessiteollisuuden turvaväylät ja autoteollisuuden väyläratkaisut. Erilaisia turvaväylästandardeja on lyhyen historian aikana kehitetty useita kymmeniä, joista suurin osa on yleiskäyttöiseen turva-automaatioon, kuten esimerkiksi kappaletavarateollisuuteen, tarkoitettuja. Näistä standardeista yleisimpiä ovat PROFIsafe, DeviceNet Safety, SafetyBus p, INTERBUS Safety, AS-i Safety at Work, Esalan ja Fieldbus Foundation SIS. Prosessiteollisuuden turvaväyliä on muutamia erilaisia (lähinnä PROFIsafe PA ja Fieldbus Foundation SIS). Toiminnallisen turvallisuuden tietoliikennestandardi IEC61784-3 määrittelee neljän yleisen turvaväylän (PROFIsafe, Fieldbus Foundation SIS, DeviceNet Safety ja INTERBUS Safety) tiedonsiirtoprofiilit sekä niiden toiminnan keskeiset ominaisuudet. Muiden väylästandardien ylläpito on usein ainoastaan niiden kehittäneiden yritysten tai organisaatioiden vastuulla [52, s. 36 – 37].

Seuraavissa kappaleissa on esitelty kolme yleistä, mutta samalla keskenään erilaista turvaväylästandardia. Esiteltäviä turvaväyliä käytetään laajalti erilaisissa sovelluksissa monimutkaisista prosesseista yksinkertaisiin työkonisiin. Vaikka lähes kaikkia turvaväyliä mainostetaan avoimina, standardeja ylläpitävät organisaatiot myyvät niitä jopa useiden tuhansien eurojen hintaan. Tämän vuoksi väylästandardeja on käsitelty eri laajuuksissa vapaasti saatavilla olevan materiaalin perusteella.

3.4.4 PROFIsafe

PROFIsafe on avoin turvaväylästandardi, jonka on julkaissut kansainvälinen automaatiovalmistajien yhteenliittymä, Profibus International. Standardin ensimmäinen versio julkaistiin PROFIBUS-väylälle vuonna 1999, ja sitä täydennettiin vuonna

2005 Ethernet-pohjaisella PROFINETilla. Toisin kuin monet muut turvaväylät, PROFIsafe on ainoastaan ylemmän protokollakerroksen määrittely eli yksi PROFIBUS- ja PROFINET-väyliä sovellusprofileista. PROFIsafe integroituu saumattomasti osaksi käyttöautomaatiota, jolloin samalla väylällä voi olla sekä tavallisen että turva-automaation laitteita. Standardi määrittelee joukon menetelmiä, joilla IEC 61508:n mukainen turvallisuuden eheystaso SIL3 saavutetaan. Nämä menetelmät ovat viestiliikenteen numerointi, aikakatkaistu, autentikointi ja CRC-tarkistussumman laskenta. Alemmalla protokollatasolla PROFIsafe-liikenne paketoituu standardin mukaisesti PROFIBUS- tai PROFINET-viesteihin. [43]

PROFIBUS on automaatiojärjestelmiin tarkoitettu kenttäväylästandardi. Ylimpänä protokollakerroksena on sovellustaso, jossa voidaan käyttää kolmea erilaista protokollaversiota. Yksinkertaisin näistä protokollista on DPV0, joka on jo poistuneen PROFIBUSin alkuperäisen FMS-version laajennos. DPV0 mahdollistaa perustoimintojen lisäksi yhden tai useamman isännän ja enintään 124:n rengin välisen syklisen kommunikaation sekä väylän diagnostiikkatoiminnot. Useamman isäntälaitteen toiminta perustuu siihen, että kukin isäntä varaa vuorollaan väylän käyttöönsä ja renki vastaa ainoastaan yhdelle isännälle kerrallaan. DPV1 on sovellusprotokollan lähinnä prosessiautomaation tarpeisiin kehitetty versio, joka mahdollistaa ei-syklisen tiedonsiirron, eli tietoa voidaan siirtää tarpeen mukaan. Myös monipuolinen hälytyksen käsittely on DPV1:n tuoma laajennos. Sovellusprotokollan tuorein DPV2-versio mahdollistaa rengiltä rengille tapahtuvan tiedonsiirron sekä väylän deterministisen toiminnan. Esimerkiksi toimilaitteiden ohjauksissa voi olla tarpeen saada väylälaitteiden kellot tahdistettua mikrosekuntien tarkkuudella samaan aikaan, joka tapahtuu PROFIBUSin isokroonisen toimintatilan avulla. Sovelluskerroksen alapuolella on seuraavaksi siirtoyhteyserro, jota kutsutaan FDL:ksi (Fieldbus Data Link) tai turvallisuuserroksi. FDL:n kehysrakenteessa määritellään muun muassa lähettäjän ja vastaanottajan osoitteet, viestityyppi sekä tarkistussumma. [43]

PROFIBUS jakautuu fyysiseltä toteutukseltaan nykyisin kahteen erilaiseen variaatioon. Näistä yleisin on PROFIBUS DP, jota käytetään laajalti kone- ja kappaletavara-automaatiossa erilaisten antureiden ja toimilaitteiden yhdistämiseen. PROFIBUS DP on sähköiseltä toteutukseltaan RS-485-väylä, jossa tietoa siirretään enintään 12 Mb/s -nopeudella kierrettyä kupariparia pitkin. Monesti väylälaitteen enimmäisnopeus on standardin enimmäisnopeutta pienempi, esimerkiksi yleinen 1,5 Mb/s. Yhteen PROFIBUS DP -segmenttiin voi liittyä enintään 32 laitetta, ja

väylän enimmäispituus riippuu täysin käytettävästi tiedonsiirtonopeudesta. PROFIBUS DP on standardin varianteista monipuolisin, koska se voi käyttää kaikkia sovelluskerroksen kolmesta eri protokollavaihtoehdosta (DPV0, DPV1 ja DPV2). [43]

Hieman harvinaisempi PROFIBUS PA on prosessiautomaatioon tarkoitettu väylä, joka Ex-luokituksensa vuoksi soveltuu räjähdysherkkiin ympäristöihin. Sitä käytetään lähinnä hitaasti muuttuvien analogisten suureiden siirtoon. IEC:n standardi 61158-2 määrittelee PROFIBUS PA:n yleisimmin käytettävän fyysisen toteutuksen, jossa tietoa siirretään kiinteällä 31,25 kb/s -nopeudella. Manchester-koodatun tiedon lisäksi samassa kaapelissa siirtyy myös muutamien wattien sähköteho. Yhdessä PROFIBUS PA -segmentissä voi olla enintään 32 laitetta, jotka liittyvät samalle enintään 1900 metriä pitkälle väylälle. Fyysinen kaapelointi voi tapahtua neljällä eri perustyyppillä, ja verkkotopologia voi olla joko tähtimäinen tai väylä. PROFIBUSin kolmesta sovelluskerroksen protokollasta PROFIBUS PA hyödyntää erityisesti prosessiautomaatioon tarkoitettua DPV1:stä, joka mahdollistaa muun muassa laitteiden parametrisoinnin ja hälytysten käsittelyn väylän yli. [43]

PROFINET on Profibus Internationalin julkaisema Ethernet-standardi teollisuussovelluksiin, joissa tarvitaan perinteistä kenttäväylää suurempaa tiedonsiirto-kapasiteettia. Nimestään huolimatta sillä ei ole juurikaan yhteistä PROFIBUS-kenttäväylän kanssa, mutta molempien väylien yli voidaan kuljettaa samojen sovellusprofiilien mukaista liikennettä – esimerkiksi PROFIsafea. PROFINET käyttää laitteiden parametrisointiin, konfigurointiin ja diagnostiikkaan tavallista TCP/IP-protokollapinoa, jota kutsutaan PROFINET CBA:ksi. Nykyisin lähes kaikkien tietoverkkojen perustana ovat Ethernet- ja TCP/IP-protokollat eivät sovellu reaaliaikaisiin järjestelmiin, joten PROFINET CBA:n latenssi voi olla useamman sadan millisekunnin luokkaa. PROFINETin reaaliaikainen kommunikaatio tapahtuu PROFINET RT -protokollalla tai sen isokroonisella versiolla, PROFINET IRT:llä. Molemmat reaaliaikaisista protokollista käyttävät siirtoyhteyskerrokselta lähtien spesifistä protokollatoteutusta, joten kyse ei ole varsinaisesti edes Ethernetistä. PROFINET IRT:llä toteutetuissa järjestelmissä vasteajat ovat pienimmillään muutamien satojen mikrosekuntien luokkaa ja vasteajojen vaihtelu alle mikrosekunnin. PROFINET käyttää fyysiseen rajapintaan standardia Ethernetiä, jossa tiedonsiirto tapahtuu tyypillisesti 100 Mb/s -nopeudella neliparisessa parikaapelissa. Harvinais-

semmillä kuituyhteyksillä yksittäisen kaapeloinnin enimmäispituudeksi saadaan useita kilometrejä, mutta parikaapeleilla enimmäispituus jää sataan metriin. [43]

Johtuen PROFIsafen lukuisista erilaisista toteutustavoista sen ominaisuuksien määrittely ei onnistu yksiselitteisesti. PROFIsafen nopeus, luotettavuus ja käyttökohteeseen soveltuvuus riippuvat täysin muun muassa valituista väyläratkaisuksista, protokollista ja siirtonopeuksista. Tyypillisissä kone- ja kappaletavara-automaation sovelluksissa PROFIsafe-turvaväylää ei kahdenneta, mutta prosessiautomaatiossa kahdennus voidaan toteuttaa rengasmaisesti PROFIBUS PA:lla [6]. Turvaväylän luotettavuutta arvioidessa käytetään IEC 61508 -standardin turvallisuuden eheystasoja, joista PROFIsafe sijoittuu toiseksi korkeimmalle SIL3-tasolle. [43]

3.4.5 SafetyBUS p

SafetyBUS p on saksalaisen Pilz GmbH:n vuosina 1995 – 1999 kehittämä turvaväylästandardi, joka on tarkoitettu erityisesti kone- ja kappaletavara-automaatioon. Nykyisin standardia ylläpitää ja teknologiaa kehittää Safety Network International -niminen organisaatio, jossa on useita kymmeniä yritysjäseniä. Kuitenkin valtaosa markkinoilla olevista SafetyBUS p -tuotteista on standardin alkuperäisen kehittäjän, Pilz GmbH:n, valmistamia. [10]

Standardi perustuu fyysiseltä toteutukseltaan CAN-väylään, jota käytetään laajalti muun muassa autoissa, työkonereissa ja teollisuussovelluksissa. SafetyBUS p:ssä CAN-väylän siirtoyhteyserroksen protokollaa on muokattu turva-automaatioon soveltuvaksi ja sovelluserroksen protokolla on täysin standardia varten kehitetty. Väylän luotettavuus perustuu useisiin menetelmiin, joita ovat pakettien numerointi, monitorointi, kaiutus ja tarkistussumman laskenta. Toisin kuin muutamissa muissa turvaväylissä, SafetyBUS p:ssä voi väylällä olla ainoastaan turva-automaatioon liitettäviä laitteita – ei siis käyttöautomaatiolaitteita. Väyläliikenteen kahdennus ei ole mahdollista, joten SafetyBUS p voi saavuttaa enintään IEC 61508:n turvallisuuden eheystason SIL3. CAN-väylässä mikä tahansa laite voi aloittaa kommunikation, joten SafetyBUS p -standardia käytettäessä ainoastaan anturin tilanmuutos aiheuttaa viestiliikenteen väylällä. Väylän vasteajat ovat erittäin pienet vähäisellä viestiliikenteellä, mutta vastaavasti viestimäärien kasvaessa toiminta hidastuu ja törmäysten mahdollisuus väylällä kasvaa. SafetyBUS p ei myöskään ole deterministinen. [10]

SafetyBUS p:n väyläkaapelointi tapahtuu suojatulla parikaapelilla, jossa tiedonsiirtonopeudet voivat olla välillä 20 – 500 kb/s. Yhdessä väylässä voi olla enintään 64 laitetta, ja verkkosegmentin enimmäispituus on 3500 metriä. Verkkosegmenttejä on myös mahdollista yhdistää toisiinsa esimerkiksi valokuiduilla tai radiolinkeillä. [10]

3.4.6 DeviceNet Safety

DeviceNet Safety on turvaväylästandardi, joka perustuu CIP-nimiseen protokollaan ja DeviceNet-kenttäväylään. Amerikkalainen automaatiovalmistaja Allen-Bradley julkaisi vuonna 1994 DeviceNet-standardin, jonka ylimmillä tiedonsiirtokerroksilla käytetään CIP-protokollaa. DeviceNet Safety on puolestaan vuonna 2004 esitelty CIP:n laajennus, joka lisää protokollan sovelluskerrokselle turvaominaisuuksia. CIP:n suunnittelun lähtökohtana oli se, että erilaiset verkot voisivat kommunikoida keskenään samalla protokollalla, ja siten CIP on riippumaton väylän fyysisestä toteutuksesta. Samaa CIP Safetyksi nimettyä sovelluskerroksen turvaprotokollaa käytetään myös muissa CIP-yhteensopivissa kenttäväylissä, jolloin kyseessä on esimerkiksi EtherNet/IP Safety. Teollisuudessa yleisin CIP-pohjainen turvaväylä on kuitenkin DeviceNet Safety. [63]

DeviceNetin fyysinen toteutus pohjautuu SafetyBUS p:n ja monen muun kenttäväylästandardin tavoin CAN-väylään, joka soveltuu hyvin teollisuuskäyttöön suorituskäytönsä, luotettavuutensa ja edullisuutensa vuoksi. Siirtoyhteykskerroksella DeviceNet käyttää CAN-standardin mukaista toteutusta ja ylemmillä kerroksilla CIP-protokollaa. Väylällä voi olla enintään 64 laitetta, joita on puolestaan kolmea erityyppiä. Isäntälaitteet hallinnoivat väyläliikennettä ja kommunikoivat renkilaitteiden kanssa. Kolmas laitetyyppi on renki, joka voi kommunikoida vertaisesti muiden renkien kanssa ilman isännän ohjausta [44]. DeviceNet-väylällä kulkevat viestit jaetaan kahteen perustyyppiin, jotka ovat IO-viesti ja yleiskäyttöinen viesti. IO-viestein kommunikaatio renkien ja isännän välillä voi karkeasti jaoteltuna tapahtua joko säännöllisillä kyselyillä tai ainoastaan jonkin tapahtuman, esimerkiksi raja-arvon ylittymisen, seurauksena [28]. IO-viestit ovat prioriteetin luokiteltuja ja siten reaaliaikaisia. Yleiskäyttöisiä viestejä hyödynnetään ei-reaaliaikaisessa tiedonsiirrossa, kuten laitteiden parametrisoinnissa ja konfiguroinnissa [50]. Yksittäisen DeviceNet-väylän laitemäärärajoite voidaan ohittaa yhdistämällä useita väyliä reititinlaitteella, jotka toimivat yhdyskäytävinä eri väylien välisille viesteille. Reitittimin yhdistettyjä

väyliä kutsutaan verkoksi. Saman osoitealueen jakavia väyliä voidaan myös yhdistää toistimien ja siltojen avulla. [63]

Standardin luotettavuus perustuu pitkälti DeviceNetin ja siten CAN-väylän perusominaisuuksiin. Alemmilla protokollakerroksilla tarkistetaan muun muassa CRC-tarkistussummien vastaavuus sekä bittikohtaisesti lähetettävän ja vastaanotettavan tiedon yhtenevyys [20]. Ylemmällä tasolla DeviceNet Safety lisää tiedonsiirron luotettavuutta erillisellä SafetyCRC-tarkistussummalla, laitetunnisteella sekä viestien aikaleimaamisella. Mikäli DeviceNet-väyliä yhdistetään toisiinsa reititinlaitteilla, siirtoyhteyksien tarkistussummat eivät kulje reitittimien läpi ja siten viestien oikeellisuutta ei voida varmistaa verkon päästä toiseen päähän. Sovelluskerroksen erillisen SafetyCRC:n avulla turvallisuuskriittiset viestit voidaan varmentaa, vaikka ne olisivat kulkeneet alempien protokollakerrosten tietoja muokkaavien laitteiden läpi. DeviceNet Safetyyn yksilöllisellä laitetunnisteella (production identifier) varmistetaan kohdelaitteen oikeellisuus tilanteissa, joissa esimerkiksi asennusvirheen vuoksi laitteen osoite on väärä tai sama osoite on useammalla laitteella. Aikaleimojen avulla tiedonsiirron reaaliaikataavoitteiden täyttymistä voidaan tarkkailla ja tarvittaessa liian kauan aikaa verkossa kulkeneet viestit voidaan hylätä. DeviceNet Safety ei ole deterministinen, koska CAN-väylällä kommunikation voi aloittaa useampi laite. Väylän läpi kulkevan komennon vasteaikaa ei siten voida taata, mutta viestin kulku-aika voidaan mitata. DeviceNet Safety -standardi täyttää turvallisuuden osalta IEC 61508:n tason SIL3 vaatimukset. [63]

DeviceNet Safetyssä tietoa siirretään kolmella vaihtoehtoisella nopeudella, jotka ovat 125 kb/s, 250 kb/s tai 500 kb/s. Väylän pituus riippuu käytetystä tiedonsiirtonopeudesta sekä kaapelityypistä, mutta enimmäispituus rajoittuu joka tapauksessa 500 metriin. Väylä kaapeloidaan kaksiparisella parikaapelilla, jonka toinen pari on varattu laitteiden tehonsyötölle. [63]

4. LAITTEISTO

4.1 Laitteiston esittely

MIL-STD-1553:n soveltuvuutta teollisuuden turva-automaatioon päätettiin tutkia koelaitteistolla, joka koostuu kahdesta hajautetusta IO-yksiköstä sekä väyläohjaimesta. Kaupallisten MIL-STD-1553-väylään liittyvien laitteiden heikon saatavuuden, korkean hinnan ja teknisen soveltumattomuuden vuoksi koelaitteisto suunniteltiin yksinomaan tätä työtä varten.

Teorian perusteella oli odotettavissa, että MIL-STD-1553 olisi erityisesti suorituskyvyn – eli toisin sanoen järjestelmän vasteaikojen ja välityskyvyn – perusteella ylivertainen moneen nykyiseen turvaväylästandardiin verrattuna. Tämän vuoksi laitteisto suunniteltiin nimenomaan suorituskykymittauksia ajatellen, yleiskäyttöisyyttä kuitenkin unohtamatta.

Laitteisto koostuu useammasta piirilevystä, jotka ovat yleiskäyttöinen väyläliityntämoduuli (1553TRC), IO-kortti (ADIO1) sekä väyläliityntämoduulin adapterikortti (TRC-ADA). Seuraavissa kappaleissa on kuvattu tarkemmin laitteiston suunnittelua ja toteutusta.

4.2 Väyläliityntämoduuli (1553TRC)

4.2.1 Toiminta-ajatus ja rakenne

Työssä tarvittiin MIL-STD-1553-liityntä sekä hajautetuissa IO-yksiköissä että väyläohjaimessa. Jotta väylätoteutusta ei olisi tarvinnut suunnitella kahteen eri laitteeseen, päätettiin se eriyttää omaksi moduulikseen. Sarjamuotoinen moduuliliityntä nimettiin TRC:ksi (Transceiver Card) ja MIL-STD-1553-kortti puolestaan 1553TRC:ksi. Moduulirakenteen etuna on suunnittelutyön yksinkertaistumisen lisäksi se, että MIL-STD-1553-väylä voidaan haluttaessa helposti korvata esimerkiksi CAN-väylällä. Myös väylälaitteiden huolto- ja päivitystyöt helpottuvat.

MIL-STD-1553:n korkeat reaaliaikavaatimukset ovat ohjelmiston kannalta usein haasteellisia. Moduulirakenteen ansiosta nopeita vasteaikoja vaativat toiminnot on hajautettu 1553TRC:lle, joten alijärjestelmän suorituskyvylle ei ole erityisvaatimuksia. Väyläliityntämoduulin tarkoituksena on siis tarjota laitteelle MIL-STD-1553-liityntä alijärjestelmän kannalta yksinkertaisesti ja joustavasti. 1553TRC voi toimia väyläohjaimena, etäterminaalina tai väylämonitorina.

1553TRC:n kytkentäkaavio on esitetty liitteessä 1 ja komponenttilistaus puolestaan liitteessä 3. Yleiskäyttöisyyden vuoksi 1553TRC suunniteltiin kestäämään normaalia teollisuusympäristöä vaativampia olosuhteita, joten komponenttien valinnassa on kiinnitetty erityistä huomiota lämpötila-alueisiin ja luotettavuuteen. Suunnittelunsa puolesta 1553TRC soveltuisi esimerkiksi useisiin avioniikkasovelluksiin.

4.2.2 Mikrokontrolleri

Vaadittavan suorituskyvyn, kehitystyökalujen saatavuuden ja aiempien kokemusten vuoksi ARM7TDMI oli jokseenkin selvä valinta 1553TRC:n prosessoriarkkitehtuuriksi. Sen sijaan erilaisia ARM7-pohjaisia vaihtoehtoja oli tarjolla lukuisia, mutta toisaalta yksikään vaihtoehtoista ei ollut ylivoimaisesti paras. Alustavina vaatimuksina olivat muun muassa sotilasteknologialle tyypillinen käyttölämpötila-alue ($-55 - 125\text{ °C}$), riittävä määrä IO-pinnejä, UART-lohko ja toimivuus vähintään 50 MHz:n kellotaajuudella. Näistä vaatimuksista jouduttiin tinkimään hieman käyttölämpötila-alueen osalta, mutta muuten vaihtoehtojen lukumäärä karsiutui yhteen: 1553TRC:n mikrokontrolleriksi valittiin NXP Semiconductorsin valmistama LPC2194 (U3). [37]

LPC2194 on tarkoitettu erityisesti autoteollisuuden vaativiin sovelluksiin, joten toimii laajennetulla käyttölämpötila-alueella ($-40 - 125\text{ °C}$). Piirissä on integroituna 16 kB SRAM-muistia, 256 kB Flash-muistia sekä lukuisia oheislaitelohkoja, kuten UART ja CAN. LPC2194:n maksimikellontaajuus on 60 MHz, joka on ARM7TDMI-arkkitehtuurin mikrokontrollerille hieman tavanomaista suurempi. 1553TRC:n toimintaa ajatellen erityisen tärkeää oli perinteisen yleiskäyttöisen IO-toiminnallisuuden lisäksi nopeampi rekisterirajapinta (Fast GPIO), joka vähentää ulkoisen muistiväylän puuttumisen tuomaa hitautta rinnakkaisliitännäisen piirin kanssa kommunikoidessa. [37]

Mikrokontrollerin 14,7456 MHz:n peruskellotaajuus tuotetaan Abraconin valmistamalla oskillaattorilla (U8), ja LPC2194:n sisäisellä vaihelukittuun silmukkaan perustuvalla loholla taajuus nelinkertaistetaan. Kello-oskillaattorin tuottamien häiriöiden vuoksi sen tehonsyöttö tapahtuu pintaliitosferriitin L2 kautta. Mikrokontrollerin käyttöjännitelinjat suodatetaan lukuisilla 100 pF:n ja 100 nF:n keraamisilla kondensaattoreilla valmistajan datalehden ohjeiden mukaisesti. Toisin kuin useimpien muiden ARM7-pohjaisten mikrokontrollereiden tapauksessa, LPC2194 vaatii ulkoisen reguloinnin prosessoriytimen 1,8 voltin käyttöjännitteelle [37]. Mikrokontrollerin tehonsyöttö käydään läpi kappaleessa 4.2.5.

1553TRC:n käyttöjännitteen kytkennän jälkeen Texas Instrumentsin valmistama jännitteenvälvontapiiri TPS3307 (U7) pitää mikrokontrollerin RESET-pinniä alhaalla 200 ms:n ajan, jottei ohjelmakoodia suoritettaisi epämääräisissä toimintatiloissa. TPS3307 valvoo sekä 1,8 että 3,3 voltin käyttöjännitteitä, ja se tuottaa hallitun uudelleenkäynnistyksen MR-sisäänmenoon tulevan ulkoisen signaalin avulla [53]. LPC2194:n ohjelmointi, testaus ja vianhaku tapahtuvat IEEE 1149.1 -standardin mukaisen JTAG-liitäntän avulla, joka on tuotu liittimeen J1. Vianhakua varten 1553TRC:ssä on myös yksi ledi, jota ohjataan transistorin Q2 kautta.

4.2.3 MIL-STD-1553-toteutus

Kappaleessa 2.7 on käyty läpi erilaisia toteutusvaihtoehtoja MIL-STD-1553-väylälle. Vaihtoehtoista useimmat on tarkoitettu yksinomaan korkean luotettavuuden soveluksiin, joissa vaaditaan esimerkiksi ionisoivan säteilyn kestoa. Teollisuussovelluksiin tällaiset vaihtoehdot ovat kuitenkin liian kalliita.

Lähinnä saatavuuden ja kustannusten rajoittamina potentiaalisia toteutustapoja oli kolme. Vaihtoehtoina olivat Holt Integrated Circuitsin (Holt IC:n) viestiprosessori HI-6110, Data Device Corporationin (DDC:n) korkean integrointiasteen hybriditoteutukset sekä FPGA-pohjainen ratkaisu. Vaihtoehtoista DDC:n tuotteet – kuten Micro-ACE-tuoteperheen hybridit – olisivat olleet toteutuksiltaan kaikkein pisimmälle vietyjä, ja niiden avulla ohjelmistotyön osuus olisi jäänyt vähäisimmäksi [17]. FPGA-piireihin perustuva ratkaisu todettiin kaikkein vaikeimmaksi ja kalleimmaksi, sillä avoimen lähdekoodin MIL-STD-1553-toteutuksen puuttuessa olisi väylätönnäkköisyys pitänyt suunnitella itse tai ostaa kaupallisen toteutuksen huomattavan kallis lisenssi.

1553TRC:n väylätoteutukseksi valittiin Holt IC:n HI-6110-viestiprosessori (U5), joka tarjoaa MIL-STD-1553:n kaikki toiminnot yhdellä mikropiirillä. Piiriin on siis integroitu väyläohjain-, etäterminaali- ja monitorointitoiminnot sekä väylän lähetin-vastaanotin. Viestiprosessori liittyy alijärjestelmään 16 bittiä leveän dataväylän avulla, jolloin piirin rekisterit ovat käsiteltävissä mikroprosessorin muistialueen kautta. HI-6110 hoitaa aikakriittisimmät matalan tason toiminnot, mutta viestin varsinainen prosessointi tulee tehdä alijärjestelmän ohjaamana [23].

NXP:n LPC2194-mikrokontrollerissa ei ole ulkoista muistiväylää, vaan HI-6110 liittyy suoraan yleiskäyttöisiin IO-linjoihin 32-bittisissä porteissa 0 ja 1. Valitussa mikrokontrollerissa ei ollut kovin monipuolisia mahdollisuuksia ulkoisten keskeytysten ja UART-lohkon datalinjojen konfiguroimiseksi eri IO-pinneihin. Tämän vuoksi 16-bittinen dataväylä piti jakaa kahteen kahdeksan bittiä leveään väylään, jotka kytkettiin kuitenkin samaan mikrokontrollerin porttiin 0. Järjestelyn haittoina ovat ylimääräiset bittien siirto-operaatiot ja tästä aiheutuvat muutamien kellojaksojen ylimääräiset viiveet. HI-6110:n osoitelinjat on kytketty oikeassa bittijärjestyksessä porttiin 1. Piirin tietyt ulostulot (VALMESS, RCVA, RCVB ja ERROR) on liitetty LPC2194:n IO-pinneihin, jotka on konfiguroitavissa myös keskeyttäviksi. Tällä tavoin voidaan oleellisesti helpottaa 1553TRC:n ohjelmiston kehitystä ja mahdollistaa tiukkojen reaaliaikavaatimusten toteutuminen. [23]

HI-6110:n muutamien toiminnot ja tilat ovat käsiteltävissä kahdella eri tavalla. Etäterminaalin väyläosoitetta lukuun ottamatta piirin sisäänmenot voidaan asettaa myös muistiväylän rekisterien kautta, sillä sisäänmenot ja rekisterien bitit on loogisilla JA-operaatioilla yhdistetty [23]. Tämän vuoksi piirin sisäänmenot RTMODE ja BCMODE on kiinteästi johdotettu maihin, koska näitä bittejä käsitellään ainoastaan rekisterien kautta. Ulostuloja RFLAG, RF0 ja RF1 ei ole kytketty mihinkään mikrokontrollerin IO-linjojen vähyden vuoksi, mutta ne eivät ole myöskään toiminnan kannalta oleellisia. HI-6110:n muut IO-linjat on kytketty suoraan mikrokontrolleriin.

MIL-STD-1553-väylän kapasiteetin ollessa täysin vain yhden väylälaitteen käytössä voi lähettävän HI-6110:n virrankulutus olla jopa puoli ampeeria [23]. Verrattain suuren ja pulssimaisen virrankulutuksen vuoksi HI-6110:n käyttöjännitteet tulee suodattaa huolellisesti. 1553TRC:ssä A- ja B-kanavien tehonsyötöt on erotettu toisistaan erillisillä johdotuksilla ja suodatuskondensaattoreilla. Jännite syötetään 3,3 voltin käyttöjännitetasosta Muratan valmistamien T-suotimien (C22 ja C23) kautta käyttöjännitesisäänmenoihin VDDA ja VDDDB, joiden vieressä on rinnan 100 nF:n

ja 22 μF :n keraamiset kondensaattorit takaamassa matalaimpedanssista suodatusta käyttöjännitteille. HI-6110:n logiikkalohkojen jännitesyöttö tapahtuu erikseen pinnin VDDLOG kautta, joka on suodatettu 100 nF:n keraamisella kondensaattorilla muiden komponenttien tapaan.

HI-6110:n vaatima joko 12 tai 24 MHz:n kellosignaali tehdään ECS:n valmistamalla kello-oskillaattorilla (U6), joka tuottaa 24 MHz:n taajuista kanttiaaltoa. Kello-oskillaattorit tyypillisesti tuottavat runsaasti häiriöitä, jotka kytkeytyvät muun muassa käyttöjännitelinjoihin. Näitä häiriöitä vähennetään käyttöjännitesyötön kanssa sarjassa olevalla pintaliitosferriitillä (L1) ja 100 nF:n suodatuskondensaattorilla.

MIL-STD-1553-standardin mukaisesti väylä on muuntajaerotettu [59, kuvat 9 – 10]. 1553TRC:ssä signaalimuuntajana käytetään Premier Magneticin PM-DB27408-komponenttia, jossa on integroitu kahden kanavan muuntajat samaan koteloon [42]. Valittu muuntaja on erityisesti MIL-STD-1553:a varten suunniteltu, ja se on eräs pienimmistä markkinoilla olevista vaihtoehtoista. Muuntajan väylän puolella on neljä kappaletta 56 ohmin isolaatiovastuksia, jotka standardin mukaan tulee olla käytössä suoraan kytketyissä väylätopologioissa. Mikäli haluttaisiin käyttää muuntajakytkettyä väylää, 1553TRC:n isolaatiovastukset tulisi korvata oikosulkupaloilla.

4.2.4 Moduuliliityntä

Moduuliliitynnän kautta alijärjestelmä syöttää 1553TRC:lle viiden voltin käyttöjännitteen, jota voi kuormittaa jatkuvasti enintään yhden ampeerin verran. Kommunikointi tapahtuu RS-422-standardin mukaisella differentiaalisella sarjaväylällä, jossa on erikseen johdinparit lähtevälle ja vastaanotettavalle datalle. Moduuliliitynnän kautta välitetään myös väyläliityntäkortin ON/OFF- ja keskeytyssignaalit sekä tässä työssä tarpeeton CAN-väylän signalointi. Fyysinen liitântä tapahtuu 24-pinnisellä piikkirimalla (J2), jonka rasteri on 2,54 mm. Luotettavuuden parantamiseksi jokainen signaali on kahdennettu. Moduuliliitynnän signaalit on listattu taulukossa 4.1.

Sarjaliikenteen suurin datanopeus on noin 3,6 Mb/s, jonka vuoksi liityntäpiiriksi on valittu enintään 25 Mb/s:n nopeuteen kykenevä Texas Instrumentsin valmistama SN65HVD30 (U1). Piiri on valmistajan *Enhanced Product* -tuotesarjasta, jonka tuotteet on tarkoitettu korkean luotettavuuden sovelluksiin, kuten avioniikkaan ja

Taulukko 4.1: Moduuliliitynnän signaalit

Pinni	Lyhenne	Kuvaus
1, 2	RS422 RXA	RS-422:n vastaanotto
3, 4	RS422 RXB	RS-422:n vastaanotto
5, 6	RS422 TXB	RS-422:n lähetys
7, 8	RS422 TXA	RS-422:n lähetys
9, 10	CAN RX	CAN:n vastaanotto
11, 12	CAN TX	CAN:n lähetys
13, 14	IRQ	Keskeytyssignaali alijärjestelmälle
15, 16	GPO 1	Yleiskäyttöinen ulostulo TRC:lle
17, 18	GPO 2	Yleiskäyttöinen ulostulo TRC:lle
19, 20	SHDN	TRC:n tehonsyötön ohjaus
21, 22	GND	Käyttöjännitteen maataso
23, 24	+5VDC	Käyttöjännite, +5 VDC

sotilasteknologiaan. SN65HVD30:n käyttölämpötila-alue on $-55 - 125$ °C, ja se on tarkoitettu noin kolmen voltin käyttöjännitetasoille. 120 ohmin vastukset R1 ja R2 terminoivat RS-422-väylän, jotta heijastukset eivät aiheuttaisi siirtolinjalle häiriöitä suurilla kommunikaationopeuksilla. Terminointivastusten 0,3 watin tehonkesto on mitoitettu siten, että ne kestävät äärilämpötiloissa viiden voltin signaalitasoilla. [55]

4.2.5 Tehonsyöttö ja muut osiot

Edellä kuvatun moduuliliitynnän syöttöjännite on 5,0 voltia, joka tulee laskea 1553TRC:n useimpien piirien vaatimalle 3,3 voltin jännitetasolle. Jännitteen pudotus on riittävän pieni, jotta se voitaisiin tehdä lineaarisesti reguloimalla ilman liiallisia tehohäviöitä. 1553TRC:n lineaariregulaattoriksi valittiin Linear Technologyn valmistama LT1963AMP (U2), joka on poikkeuksellisen hyvät suoritusarvot omaava niin sanottu LDO-regulaattori. Se toimii sotilasteknologiaalle tyypillisellä käyttölämpötila-alueella $-55 - 125$ °C. [30]

LT1963AMP:n ulostulojännite on säädettävissä ulkoisella takaisinkytkennällä, jonka muodostavat jännitejakovastukset R6, R7 ja R8. Regulaattorin ulostulo on suodatettu 22 μ F:n keraamisella kondensaattorilla (C12) ja sisäänmeno puolestaan 68 μ F:n korkean luotettavuuden tantaalikondensaattorilla (C3). 1553TRC:n alijärjestelmälle tuottamia häiriöitä torjumaan kytkennässä on Muratan valmistama LC-suodinkomponentti (LC1), jonka molemmiin puolin on 100 nF:n keraamiset kondensaattorit. Oikosulku- ja ylijännitesuojauksia ei varsinaisesti ole, sillä tar-

koin suunniteltuun alijärjestelmään asennettavan 1553TRC:n tapauksessa ne eivät ole tarpeen. TRC-liittymän ON/OFF-signaali on invertoitu transistorin Q1 ja muutaman vastuksen avulla.

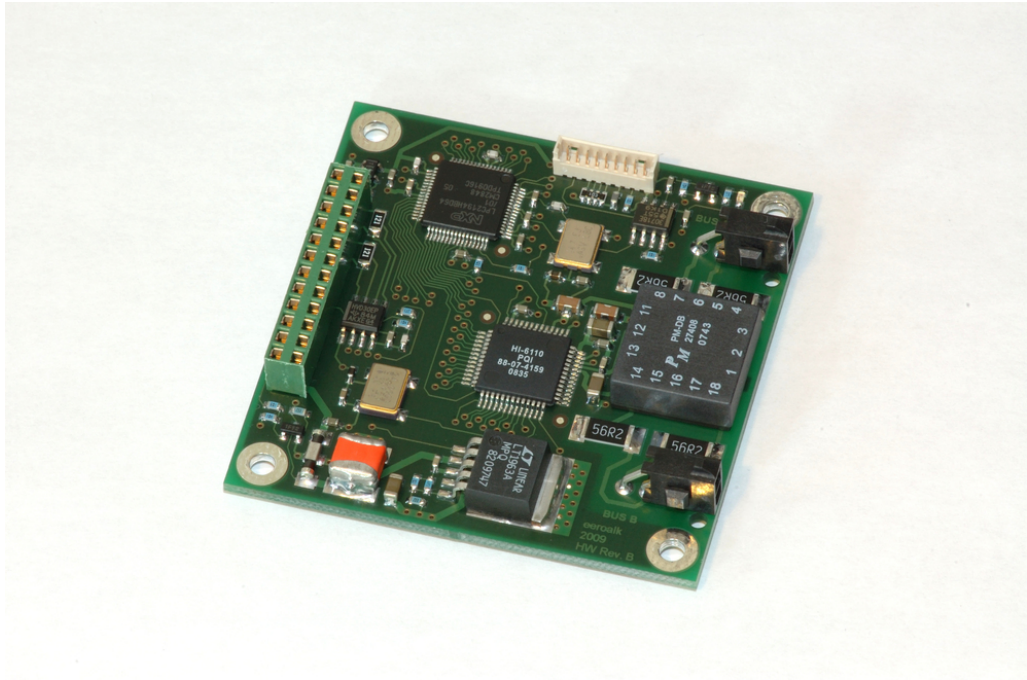
LPC2194-mikrokontrollerin ytimen vaatima 1,8 voltin käyttöjännite reguloidaan edelleen 3,3 voltista Texas Instrumentsin valmistamalla regulaattoripiirillä TPS73618 (U4). Piiri on niinkään *Enhanced Product* -tuotelinjaan kuuluva, joten se toimii laajennetulla käyttölämpötila-alueella. 1,8 voltin regulaattorin sisäänmenot ja ulostulot on suodatettu 100 nF:n keraamisilla kondensaattorein, ja ulostulon kohinaa vähennetään erikseen kondensaattorilla C14 valmistajan datalehden suosituksen mukaisesti. [56]

4.2.6 Piirilevysuunnittelu

1553TRC:n kytkentä ja piirilevy suunniteltiin Labcenter Electronicsin Proteus-ohjelmistolla. Piirilevyn mitoiksi valittiin 60 x 60 mm, ja johdinvetojen suuren määrän vuoksi piirilevystä päätettiin tehdä nelikerroksinen. Piirilevymateriaalina on FR4-tyyppinen lasikuitulaminaatti paksuudeltaan 1,6 mm. Piirilevyn kerrosmäärän valintaan vaikuttivat myös lämmönhallintaan liittyvät seikat sekä halu tehdä piirilevystä sähkömagneettiselta yhteensopivuudeltaan mahdollisimman hyvä. Nelikerroksisen piirilevyn yksi kerros on pelkästään maatasoa, jonka ansiosta levyllä on kaikkialla matalaimpedanssinen yhteys maahan. Lisäksi yhtenäinen maataso jakaa tehokkaasti lämpökuormaa. Piirilevyn kiinnitystä varten siinä on jokaisessa kulmassa 3 mm:n reikä 4 mm:n päässä levyn reunoista. Koneellista ladontaa ajatellen piirilevyn kunkin QFP-koteloisen piirin ympärillä on kahdet kohdistusmerkit.

Yleisten suunnittelukäytäntöjen mukaisesti nelikerroksisen piirilevyn ylä- ja alapuolel on varattu signaalijohdotuksille. Välikerroksina ovat maataso sekä 3,3 voltin käyttöjännitetaso, jossa on myös muutamia signaalivetoja. Piirilevyn eri kerrokset ja muut kuvat on esitelty liitteessä 2.

Prototyypin piirilevyt tilattiin Beta Layout Ltd:stä, Irlannista. Työtä varten 1553TRC:n piirilevyjä kasattiin käsin juottamalla kolme kappaletta. Komponentteja piirilevyllä on 69 kappaletta. Valmiiksi kasatun 1553TRC:n piirilevy on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1: 1553TRC:n piirilevy

4.3 Hajautettu IO-yksikkö (ADIO1)

4.3.1 Toiminta-ajatus ja rakenne

Hajautetun IO-yksikön tärkein vaatimus oli tarjota MIL-STD-1553-väylään liittyviä digitaalisia sisäänmenoja ja ulostuloja. Muun muassa koneautomaatiossa lähes kaikki turvallisuuskriittinen tieto on diskreettejä digitaaliviestejä, kuten induktiivisten antureiden tai rajakytkimien tuottamia signaaleja. ADIO1:n suunnittelussa on kiinnitetty erityistä huomiota digitaalisten signaalien luotettavuuteen ja nopeuteen.

Prosessiteollisuuden vaatimukset hajautetulle IO-yksikölle eroavat oleellisesti muusta turva-automaatiosta, sillä prosessiteollisuudessa sisäänmenot ovat usein analogisia suureita, kuten lämpötiloja ja paineita. Ulostulot ohjaavat tyypillisesti venttiilien asennoittimia ja pumppujen taajuusmuuttajia. Prosessiteollisuuden turva-automaatiota ajatellen ADIO1:een toteutettiin analogisia sisäänmenoja ja ulostuloja. Analogisten liitäntöjen osalta pääpaino on käytännöllisyydessä ja tarkkuudessa, ei niinkään vasteajoissa.

ADIO1 on siis hajautettu IO-yksikkö, joka liittää 1553TRC:n avulla MIL-STD-1553-väylään analogisia ja digitaalisia signaaleja. Laitteen kytkentäkaavio on esitetty liitteessä 4 ja komponenttilistaus puolestaan liitteessä 6.

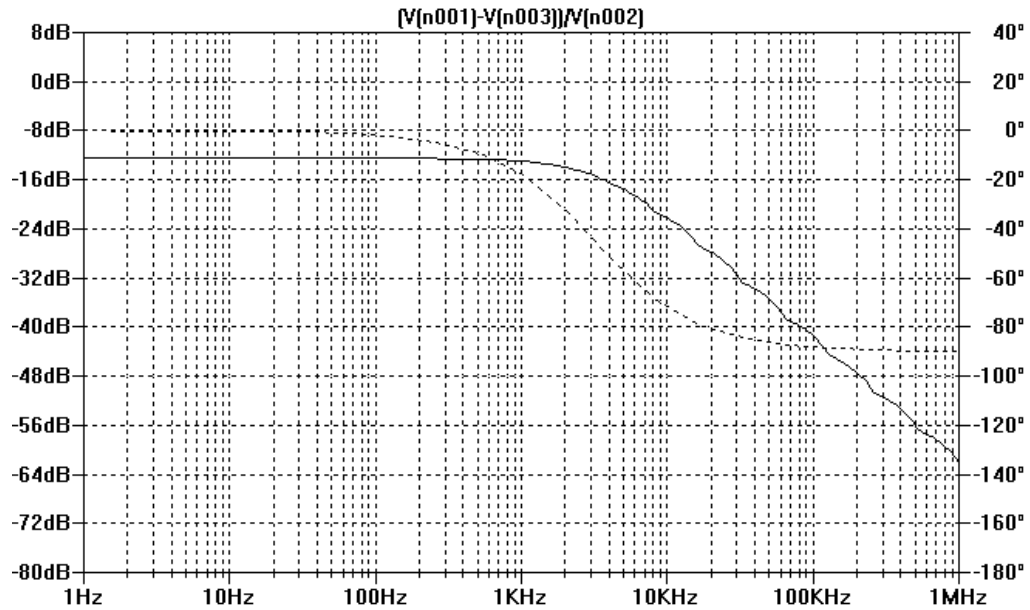
4.3.2 Analogiset mittaukset ja ulostulot

Teollisuusympäristössä analogista tietoa siirretään tyypillisesti joko 4 – 20 mA -virtaviestinä tai 0 – 10 V -jänniteviestinä. Virtaviesti soveltuu parhaiten häiriöiseen ympäristöön pitkille kaapelipituuksille ja jänniteviesti puolestaan lyhyille etäisyyksille, joissa käytetään suojattuja kaapeleita. Mikäli mittausketju anturista AD-muuntimeen ei ole täysin tiedossa ja määritelty, voi virtaviestiä käytettäessä laitteistosta syntyä ylimääräistä virhettä mittauksiin. Jänniteviestillä puolestaan kaapeliresistanssi ja kytkeytyvät häiriöt voivat aiheuttaa merkittäviäkin virheitä. [57]

Tässä työssä ei ole asetettu erityisiä vaatimuksia analogisille liitännöille, joten ne on suunniteltu lähinnä tarkkuutta ajatellen normaalien käytäntöjen mukaisesti. ADIO1:n kuusi analogista sisäänmenoa päätettiin toteuttaa jännitetyyppisiksi, koska herkimpien anturisignaalien mittaamisessa se on soveltuvin tapa. Lisäksi jännitesisäänmenot voidaan tarvittaessa yksinkertaisesti konvertoida virtaviesteille soveltuviksi lisäämällä kanavakohtaiset referenssivastukset.

AD-muuntimeksi valittiin Analog Devicesin valmistama AD7794 (U6), joka on kuusikanavainen ja 24-bittinen $\Delta\Sigma$ -tyyppinen muunnin [3]. Piirin sisäänmenot ovat differentiaalisia, joten anturien virrankulutuksen aiheuttamat virheet ja mahdolliset maahan kytkeytyvät häiriöt saadaan tehokkaasti eliminoidua. Jännitteen skaalaus ja alipäästösuodatus tehdään yhdistetyssä kytkennässä kolmella vastuksella ja kolmella kondensaattorilla. Kytkennän komponenttiarvot on haettu Linear Technologyn LTspice-simulaattorilla, jotta muuntimen suurimmalla näytteistystaajuudella suodinkytkennän vaimennus päästökaistastaan nähden olisi enintään 0,1 dB ja vaimennus päästökaistalla puolestaan noin 12,5 dB (skaalauskerroin noin 0,24). AD-muuntimen suurin näytteistystaajuus on 470 Hz, jolloin edellä mainitut vaatimukset huomioiden alipäästösuotimen rajataajuudeksi saadaan noin 6 kHz ja päästökaistan vaimennukseksi 12,5 dB. Suodinkytkentää mitoitettaessa tärkein kriteeri oli mahdollisimman pieni vahvistusvirhe koko taajuuskaistalla. Kytkennän vastukset ovat perustarkkuudeltaan 0,1 % ja kondensaattorit puolestaan 1 %, joten komponenttien toleransseilla ei ole merkitystä suotimen suoritusarvoihin. Kuvassa 4.2 esitetään suotimen taajuusvaste.

AD7794:ssä on oma sisäinen jännitereferenssi, mutta sen asemesta käytetään Analog Devicesin valmistamaa tarkkuusreferenssiä ADR441B (U7). Referenssiipiiri tuottaa



Kuva 4.2: ADIO1:n analogisten sisäänmenojen taajuusvaste

2,5 voltin jännitteen ± 1 mV:n perustarkkuudella ja 3 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ lämpötilariippuvuudella [4]. Referenssin jännitetarkkuutta voisi parantaa kytkemällä TRIM-pinniin potentiometrin, jolloin ulostulon voisi kalibroida laitekohtaisesti. Potentiometrin vaatiman suuren piirilevyypinta-alan ja referenssipiirin sinänsä jo erittäin hyvän perustarkkuuden vuoksi tätä mahdollisuutta ei kuitenkaan hyödynnetty. Sekä jännitereferenssi että AD-muunnin on suodatettu käyttöjännitelinjoihin osalta rinnan olevin 100 nF:n ja 10 μF :n keraamisina kondensaattoreina. Lisäksi analogiaosion maataso ja käyttöjännitelinja on erotettu digitaali-osion vastaavista, jotta digitaalikytkentöjen nopeat nousuajat ynnä muut eivät aiheuttaisi häiriöitä analogisiin mittauksiin. Maatasot on yhdistetty yhdessä pisteessä ferriitin L3 kautta. Analogiakytken käyttäjännite suodatetaan komponenttien L2 ja C17 muodostamalla LC-alipäästösuotimella.

Analogisia jänniteviestejä voidaan käyttää erilaisten toimilaitteiden ohjaamiseen. ADIO1:een päätettiin toteuttaa neljä kappaletta 0 – 10 voltin jänniteulostuloa käyttäen Analog Devicesin valmistamaa 16-bittistä DA-muunninta AD5666 (U4). Piirisä on sisäinen jännitereferenssi AD-muuntimen tapaan, mutta se päätettiin korvata ulkoisen referenssin (U7) tuottamalla 2,5 voltin jännitteellä. [5]

Tarvittava 0 – 10 voltin jännitealue saadaan Analog Devicesin nelikköoperaatiovahvistimeen (U5) perustuvilla vahvistinkytkennoillä, jotka vahvistavat DA-muuntimen ulostulon kertoimella 4,3. Operaatiovahvistin AD8664 valittiin pääasiassa poikkeuksellisen pienen offset-jännitteen, korkean tarkkuuden ja suuren virranantokyvyn

vuoksi [2]. Vahvistuskytkennät stabiloidaan kapasitiivisten kuormien varalta 180 pF:n keraamisilla kondensaattoreilla ulostulon ja negatiivisen sisäänmenon välillä. Kompensointikondensaattorien arvot on haettu kokeellisesti LTspice-simulaattorin avulla. Jännitelähtöjen ylikuormitus- ja ESD-suojaus on toteutettu ulostulosten kanssa sarjassa olevilla 100 ohmin pintaliitettävillä PTC-vastuksilla ja AVX:n valmistamilla Transguard-ylijännitesuojilla, jotka reagoivat komponentin yli olevan jännitteen ollessa enemmän kuin 14 voltia.

ADIO1:n sisäänmenojännitteiden sekä piirilevyn lämpötilan mittaamista varten kytkennässä on myös matalan resoluution AD-muunnin (U8). National Semiconductorin valmistama ADC128S052 on 12-bittinen ja 8-kanavainen muunnin, jonka analogipuolen käyttöjännite toimii suoraan referenssijännitteenä [35]. Muuntimen kahteen ensimmäiseen kanavaan on kytketty 0,1 %:n tarkkuusvastuksilla skaalatut sisäänmenojännitteet ja kolmanteen kanavaan on kytketty National Semiconductorin valmistama lämpötila-anturi, LM60 (U13). Jännitemittauksia on suodatettu muodostamalla jännitejakokytkentään lisätyillä kondensaattoreilla C63 ja C64 alipäästösuotimet signaaleille. Lämpötila-anturin ulostuloa on suodatettu niin ikään RC-alipäästösuotimella, joka muodostuu komponenteista C5 ja R90.

Molemmat AD-muuntimet sekä DA-muunnin on kytketty SPI-väylän kautta mikrokontrolleriin. SPI on alun perin Motorolan kehittämä synkroninen sarjaväylä, joka on tarkoitettu mikropiirien väliseen kommunikointiin. Väylä on kaksisuuntainen eli siinä on erikseen datalinjat lähtevälle ja vastaanotettavalle datalle, ja lisäksi SPI:ssä on erillinen kello-signaali. Ainoastaan yksi piiri voi olla kerralla aktiivisena, joten piirin valinta tapahtuu piirikohtaisilla valintasiignaaleilla. [13]

4.3.3 Digitaaliset anturi- ja toimilaiteliitännät

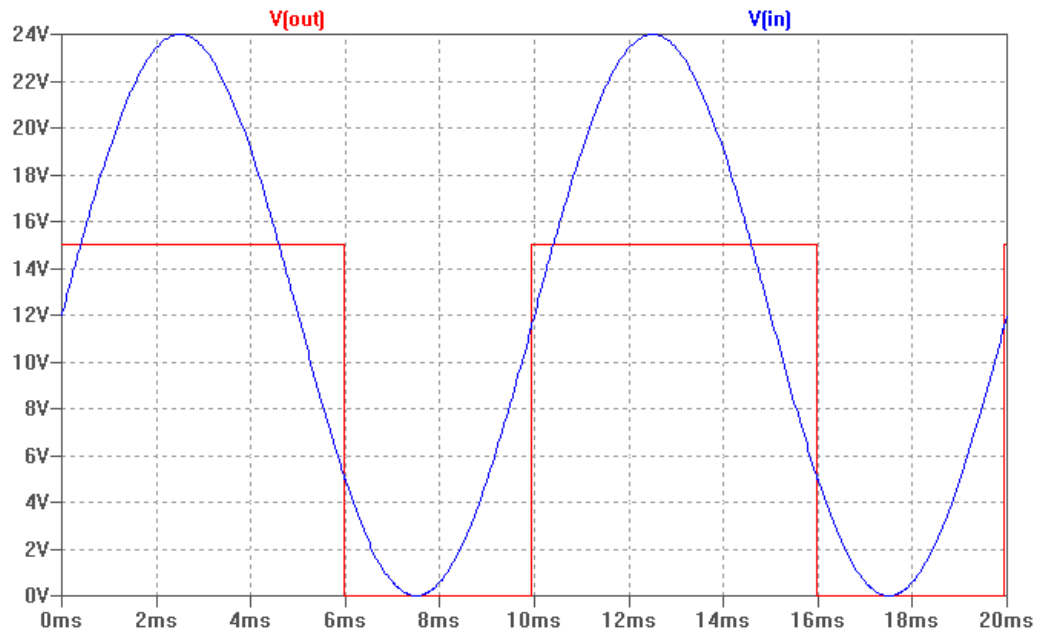
Digitaalisten tilasiignaalien siirtoon on teollisuussovelluksissa käytännössä kaksi vaihtoehtoa: NPN- tai PNP-tyyppiset avokollektorisignaalit. NPN-tyyppisillä signaaleilla kuorma on kytketty ulostulon ja käyttöjännitteen välille, kun taas PNP-tyyppisillä signaaleilla kuorma on ulostulon ja maan välillä. ADIO1:n digitaaliset sisäänmenot ja ulostulot päätettiin toteuttaa PNP-tyyppisiksi, koska se on Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa vallitseva käytäntö teollisuudessa [18].

IEC:n standardi 61131-2 määrittelee turva-automaatiossa käytettävien digitaalisten tilasiignaalien jännitetasot, impedanssit ja muut ominaisuudet. ADIO1:n neljä di-

gitaalista sisäänmenoa on toteutettu IEC 61131-2 -standardin tyyppin 3 mukaisesti, jolloin loogisen '0'-signaalin jännite on välillä $-3 - 5$ V ja loogisen '1'-signaalin jännite puolestaan välillä $11 - 30$ V [45]. Standardi määrittelee myös tavat toteuttaa ulostulojen ja sisäänmenojen testauksen lyhyillä testipulsseilla. Koska standardi ei ollut saatavilla ilman kohtuuttomia kustannuksia, ADIO1:n sisäänmenoja ja ulostuloja ei voitu toteuttaa kokonaisuudessaan standardin mukaisesti. Testipulsseilla tapahtuvia tilojen testauksia ei siis toteutettu, mutta tarvittaessa luotettavuutta voitaisiin lisätä kytkemällä kaksi sisäänmenoa rinnakkain ja käyttämällä sisäänmenoja ulostulojen tarkistukseen.

Sisäänmenot on toteutettu siten, että kuormana on 10 kilo-ohmin vastus sekä 15 voltin zener-diodi 3,3 kilo-ohmin sarjavastuksella. Zenerin katodilta saadaan noin 15 volttiin rajoitettu ulostulojännite komparaattorin positiiviseen sisäänmenoon syötettäväksi. IEC 61131-2:n mukainen hystereesi tehdään vastuksella operaatiovahvistimen ulostulosta positiiviseen sisäänmenoon. Texas Instrumentsin LM2902-tyyppisen operaatiovahvistimien (U9) negatiivisissa sisäänmenoissa on noin 8 voltin referenssijännite, joka on tehty zener-diodin D5 avulla. Operaatiovahvistimien ulostulojännitteet rajoitetaan 3,3 volttiin zener-diodeilla, ja signaali invertoidaan Texas Instrumentsin niin sanotuilla schmitt-trigger-porteilla (U12). Komparaattorikytkennän komponenttiarvot on haettu LTspice-ohjelmalla simuloidulla, ja sisäänmenon vaste on esitetty kuvassa 4.3. Piirin U11 sisältämällä kolmella XOR-portilla tehdään sisäänmenosignaaleista keskeytyssignaali mikrokontrollerille. Jokainen sisäänmenon muutos aiheuttaa keskeytyssignaalin tilan muutoksen, jolloin tilojen välitön lukeminen voidaan yksinkertaisesti toteuttaa kaksireunaisella keskeytyksellä.

Digitaaliset ulostulot on toteutettu PNP-tyyppisillä FCX705-transistoreilla, joita ohjataan NPN-tyyppisten BC847-transistorien avulla logiikkatasoisilla signaaleilla. Ulostulojen jatkuva maksimivirta on rajoitettu 200 milliampeeriin palautuvilla Polyfuse-sulakkeilla ja polariteettisuojaus on toteutettu schottky-tyyppisillä 10MQ100-diodeilla (D18 – D21). Ulostulojen luotettavuuden parantamiseksi niiden ohjaus tapahtuu nelikanavaisen 2:1-valitsimen kautta (U10). Piirin U11 yksi XOR-portti ohjaa valitsinpiirin A/B-pinniä, jolla valitaan joko ulostulojen ohjaus mikrokontrollerin kautta tai ulostulojen nollatila. XOR-portin sisäänmenojen tulee erota toisistaan, jotta mikrokontrolleri voisi ohjata ulostuloja. Tällä kytkennällä



Kuva 4.3: ADIO1:n digitaalisten sisäänmenojen vaste

vähennetään sen todennäköisyyttä, että ulostuloja ohjattaisiin mikrokontrollerin ollessa epänormaalissa toimintatilassa.

4.3.4 Mikrokontrolleri ja muistit

ADIO1:n mikrokontrolleriksi valittiin Atmelin valmistama AT91SAM7A3 (U14), joka on 32-bittiseen ARM7TDMI-arkkitehtuuriin perustuva prosessori integroiduilla muisteilla ja oheislaitelohkoilla. Mikrokontrollerissa on 256 kilotavua Flash-muistia sekä 32 kilotavua SRAM-muistia. Piirin sisäisiin oheislaitelohkoihin kuuluvat muun muassa kolme USART-lohkoa, kaksi CAN-lohkoa sekä SPI- ja I²C-lohkot. AT91SAM7A3:ssa on sisäinen jänniteregulaattori prosessoriytimelle, joten piiri vaatii ainoastaan 3,3 voltin käyttöjännitteen toimiakseen. Piirin käyttöjännitesyötöt on suodatettu lukuisilla keraamisilla kondensaattoreilla valmistajan suosituksia mukaillen. [7]

Laitteen ohjelmistossa on useita käyttäjän muutettavia asetuksia, jotka täytyy tallentaa haihtumattomaan muistiin. AT91SAM7A3:n Flash-muisti on tarkoitettu suoritettavalle ohjelmakoodille, joten yksittäisten asetusten tallentaminen siihen ei olisi yksinkertaisesti toteutettavissa eikä muutenkaan tarkoituksen mukaista. ADIO1:n asetukset tallennetaan Microchipin valmistamaan ulkoiseen 24LC64-muistipiiriin (U17), joka on 8 kilotavun kokoinen ja I²C-liitäntäinen

EEPROM-piiri. Sarjamuotoisen I²C-liikennöinnin vaatimat ylösvetovastukset (R86 ja R87) on mitoitettu enintään 1 MHz:n kellotaajuudelle.

Mikrokontrollerin peruskellotaajuus tehdään Abraconin valmistamalla 14,7456 MHz:n oskillaattoripiirillä (U19), jonka tuottama taajuus nelinkertaistetaan AT91SAM7A3:n sisäisellä vaihelukittuun silmukkaan perustuvalla kertojalla. Oskillaattorin käyttöjännitetasoon tuottamia häiriöitä suodatetaan pintaliitettävällä ferriitillä (L4) ja 100 nF:n keraamisella suotokondensaattorilla. Mikrokontrollerin oskillaattorilohko tarvitsee vaihelukitulle silmukalle ulkoiset suodinkomponentit (C83, C84 ja R81), jotka on mitoitettu Atmelin tarjoamalla Excel-sovelluksella.

Texas Instrumentsin jännitevalvontapiirillä TPS3809 (U18) huolehditaan siitä, että mikrokontrolleri on reset-tilassa käyttöjännitteiden kytkentävaiheessa. Jännitevalvontapiirin ulostulo on kytketty mikrokontrolleriin 10 kilo-ohmin vastuksen kautta, jotta mikrokontrollerille voitaisiin tuottaa reset-signaali myös JTAG-liitännän kautta.

AT91SAM7A3:n ohjelmointi, testaus ja vianhaku tapahtuvat IEEE 1149.1-standardin mukaisen JTAG-liitännän avulla, joka on tuotu liittimeen J7. Liitännän käyttöjännitesyöttö on suojattu ylikuormitukselta 100 ohmin PTC-vastuksella R83, ja JTAG-liitännän signaalit on ylösvedetty standardin mukaisesti vastusverkolla RN1.

4.3.5 Muut osiot ja toiminnot

ADIO1:ssä on RS-232-sarjaportti laitteen konfiguroimista ja hallintaa varten. RS-232-liitännän puskurointi tehdään Texas Instrumentsin MAX3232-piirillä (U16), joka liittyy 3,3 voltin logiikkatasoisilla signaaleilla mikrokontrollerin yhteen USART-lohkoon. RS-232:n jännitetasot tehdään varauspumpuilla, joita varten MAX3232:n liittyy viisi 100 nF:n keraamista kondensaattoria [54]. J6-liittimeen johdotetun RS-232-liitännän ylijännitesuojaus on toteutettu 33 ohmin PTC-vastuksilla (R79 ja R80) sekä 15 voltin jännitteessä aktivoituvilla Ceradiode-ylijännitesuojilla (D22 ja D23). Samaan J6-liittimeen on tuotu myös kaksi kappaletta TTL-tasoista ulostuloa, joita ohjataan suoraan mikrokontrollerin kahdella ulostulolla. Tasomuunnos 3,3 voltista 5,0 volttiin tapahtuu Texas Instrumentsin SN74LVC2T45-piireillä. Näiden ulostulojen suojaukset ovat samanlaiset kuin RS-232-liitännässä.

TRC-moduuliliityntää (J5) varten yhden mikrokontrollerin USART-lohkon signaalit muutetaan differentiaaliksi RS-422-signaaleiksi Texas Instrumentsin valmistamalla SN65HVD30-piirillä (U15). 120 ohmin vastukset R77 ja R78 terminoivat RS-422-väylän, jotta heijastukset eivät aiheuttaisi siirtolinjalle häiriöitä suurilla kommunikationopeuksilla. RS-422:n ja käyttöjännitesyötön lisäksi TRC-moduuliliityntään on johdotettu mikrokontrollerin CAN-signaalit, muutamia ohjausulostuloja ja keskeytysignaali TRC:ltä. [55]

ADIO1:n väyläosoite valitaan kuusiasentoisella Grayhillin valmistamalla DIP-kytkimellä (SW1). Osoitteen luennassa hyödynnetään mikrokontrollerin sisäisiä ylösvetovastuksia, jotka konfiguroidaan käyttöön ohjelmallisesti. Laitteen toiminnan havainnoimista varten ADIO1:ssa on kaksi piirilevyn ulkopuolista lediä, joita ohjataan kahdella P-kanavaisella MOSFET-transistorilla. Ledien virtaa rajoitetaan kahdella 270 ohmin etuvastuksella.

4.3.6 Tehonsyöttö

ADIO1:n tehonsyöttö on kahdennettu katodeista yhteen kytketyillä kaksoisdiodeilla D3 ja D4. Lisäksi anturien ja toimilaitteiden tehonsyöttö on erotettu ADIO1:n omasta tehonsyötöstä näiden diodien avulla. Sisäänmenojen ylivirtasuojaus on tehty palautuvilla Polyfuse-sulakkeilla (FU1 ja FU2), jotka aktivoituvat niiden yli olevan virran ylittäessä 500 milliampeeria. Ylijännitesuojaukseen tapahtuu Transil-ylijännitesuojilla (TRG1 ja TRG2), jotka aktivoituvat 36 voltin jännitteessä ja tällöin myös ylivirtasuojat aktivoituvat. ADIO1:n tuottamia häiriöitä käyttöjännitesyöttöihin päin suodatetaan yhteismuotokuristimella T1 ja sen ympärillä olevilla kondensaattoreilla. Eromuotoisten ja radiotaajuisten häiriöiden eteneminen estetään Muratan valmistamalla LC-alipäästösuotimella LC1 ja keraamisilla suotokondensaattoreilla.

Moduuliliitynnän vaatimusten mukaan alijärjestelmän tulee voida syöttää väyläliityntäkortille enintään 1,0 ampeeria 5 voltin käyttöjännitteellä. Tämän verrattain suuren tehovaatimuksen vuoksi lineaariregulointi ei ollut mahdollista, joten 5 voltin käyttöjännite päätettiin tuottaa Linear Technologyn LT3431-piiriin perustuvalle niin sanotulle buck-hakkurilla (U1). LT3431 on 500 kHz:n taajuudella toimiva hakkuriohjain, jonka käyttöjännitealue ulottuu 60 volttiin asti. Piirin sisälle on integroitu kytkin-MOSFET, jonka enimmäisvirta on 3 ampeeria. [29]

LT3431-piiriin perustuva jännitettä laskeva hakkurikytkentä on suunniteltu valmistajan datalehden suositusten perusteella. Kytkennän $10\ \mu\text{H}$:n kela L1 ja $220\ \mu\text{F}$:n kondensaattori C1 on mitoitettu siten, että ulostulovirta voisi olla jatkuvana enintään 2,0 ampeeria. Diodi D2 ja kondensaattori C2 muodostavat LT3431:n toiminnan kannalta oleellisen ohjausjännitteen sisäiselle MOSFET-kytkimelle; nämä komponentit on valittu datalehden suositusten perusteella. Hakkuriohjain vaatii ulkoiset kompensointikomponentit C3, C4 ja R3, joilla saadaan lisättyä siirtofunktion Bodeesitykseen ylimääräinen nollakohta vaihevaran lisäämiseksi ja transienttivasteen parantamiseksi. Komponentit on mitoitettu piirin valmistajan datalehden mukaan, ja kytkennän vakaus on varmistettu LTspice-simulaattorilla. [29]

Ulostulojännite asetetaan 5,0 volttiin ulkoisten takaisinkytkentävastusten R1 ja R2 avulla. Takaisinkytkennän vertailujännite on 1,22 voltia, joka muodostuu LT3431:n sisäisen erovahvistimen ohjaamana FB-pinniin [29]. Hakkureille on tyypillistä se, että ne aiheuttavat sisäänmenoon korkeataajuisia virtapiikkejä ja siten myös jännitteen vaihteluja. Virtapiikkien luomien sähkömagneettisten häiriöiden lisäksi hakkuriohjaimen toiminta voi häiriintyä sisäänmenojännitteen vaihdellessa. Tämän vuoksi LT3431-piirin VIN-pinnien jännite on suodatettu $2,2\ \mu\text{F}$:n keraamisella kondensaattorilla C8 sekä $22\ \mu\text{F}$:n korkean luotettavuuden märkätantaalikondensaattorilla C9. Normaaleissa teollisuussovelluksissa käytettäisiin C9:n paikalla alumiinielektrolyyttikondensaattoreita, joilla on varsin rajallinen käyttöikä korkeissa lämpötiloissa ja suurilla rippelivirroilla. Vishayn 135D-sarjan märkätantaali on hinnaltaan monikymmenkertaisesti alumiinielektrolyyttikondensaattoria kalliimpi, mutta se on poikkeuksellisen pitkäikäinen ja kestää korkeita lämpötiloja $200\ ^\circ\text{C}$ asti.

Hakkurikytkennän tuottama 5,0 voltia syötetään TRC-moduuliliitynnälle sekä National Semiconductorsin valmistamalle regulaattoripiirille LM2989:lle (U3). LM2989:n kiinteän ulostulojännitteen malli tuottaa 3,3 voltin käyttöjännitteen kaikille ADIO1:n digitaaliosion komponenteille. Regulaattorin sisäänmeno ja ulostulo on suodatettu $10\ \mu\text{F}$:n keraamisilla kondensaattoreilla, ja ulostulossa on lisäksi $220\ \mu\text{F}$:n tantaalikondensaattori. Rippelin vähentämiseksi regulaattorin BYPASS-pinnistä maahan on kytketty $10\ \text{nF}$:n keraaminen kondensaattori valmistajan datalehden suositusten mukaisesti. [34]

Sisäänmeno- ja ulostulokytkentöjen operaatiovahvistimien vaatima 14 voltin jännite tehdään lineaarisesti reguloimalla suoraan suodatetusta käyttöjännitteestä. Regulaattorina (U2) käytetään pintaliitettävää LM317-piirin laajennetun

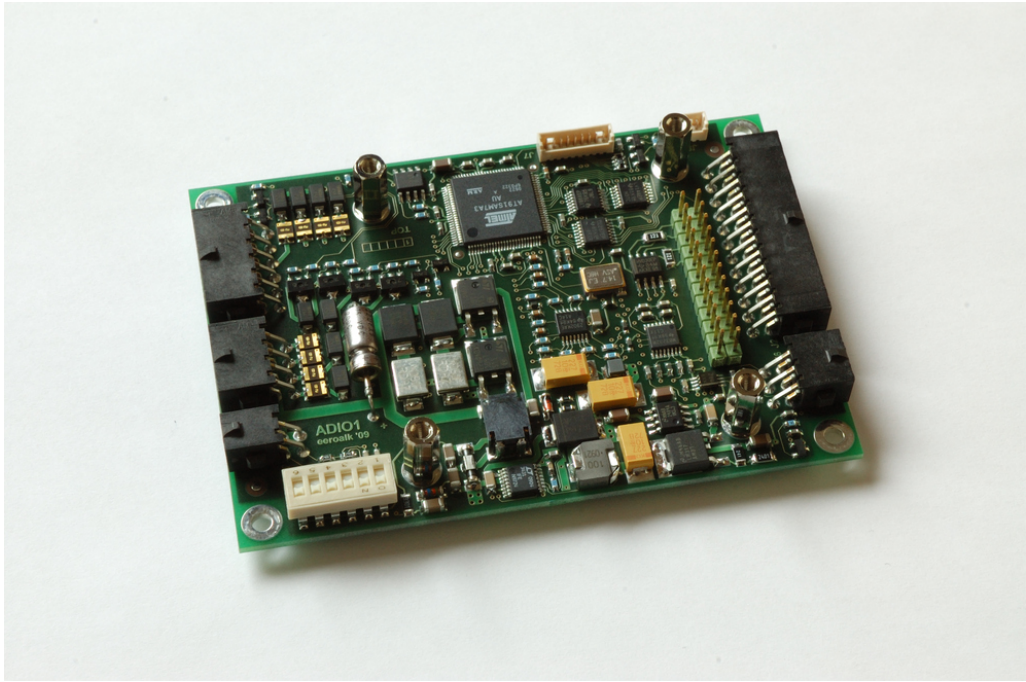
käyttölämpötila-alueen versiota. ADIO1:n 14 voltin käyttöjännitelinjan virrankulutus on niin pieni, että lineaarinen regulointi edes suurimmalla sallitulla sisäänmeno-jännitteellä ei aiheuta merkittävää lämmöntuottoa. LM317-regulaattorin ulostulojännite asetetaan ulkoisella vastusjaolla komponenttien R4 ja R5 avulla. Sisäänmenon suoto tapahtuu 220 nF:n keraamisella kondensaattorilla ja ulostulon suoto puolestaan 2,2 μ F:n keraamisella kondensaattorilla. [36]

4.3.7 Piirilevysuunnittelu

Alunperin ADIO1:n piirilevystä piti tehdä 75 x 100 mm -kokoinen eli puolet yleisestä eurokorttikoosta. Valitun kotelon mittojen vuoksi piirilevyn leveyttä piti kaventaa 5 mm, jotta se olisi sopinut mekaanisesti koteloon. Piirilevyn koko on siis 70 x 100 mm, ja kiinnitystä varten siinä on jokaisessa kulmassa 3 mm:n reikä 4 mm:n päässä levyn reunoista. Kuusikerroksisen piirilevyn materiaalina on 1,6 mm paksu FR4-tyyppinen lasikuitulaminaatti. Koneellista ladontaa varten mikrokontrollerin ympärillä on kahdet kohdistusmerkit, ja lisäksi levyn molemmin puolin on kolmessa reunassa globaalit kohdistusmerkit. Kerrosjärjestyksen osoittamiseksi jokainen kuparikerros on numeroitu.

Kuusikerroksiseen piirilevyrakenteeseen päädyttiin ADIO1:n haastavien vaatimusten vuoksi; samassa kytkennässä on herkkien analogiasignaalien mittausta, nopeaa digitaalilogiikkaa sekä hakkuriteholähde. Analogiaosion komponentit päätettiin sijoittaa levyn alapuolelle ja muut komponentit yläpuolelle. Ensimmäinen sisäkerros on kokonaisuudessaan digitaalista maatasoa (DGND), ja viimeinen sisäkerros puolittain analogista maatasoa (AGND). Tällä ratkaisulla on minimoitu digitaaliasion ja hakkuriteholähdekytkennän aiheuttamat häiriöt analogisiin mittauksiin. Levyn ylä- ja alapuolien lisäksi signaalivetoja kuljetetaan kahden maatason välissä olevilla kahdella kerroksella, joista ylemmällä on ainoastaan digitaalisia signaaleja ja alemmalla hitaiden digitaalisten lisäksi myös analogisia signaaleja. Välikerrosten tyhjät alueet on täytetty kuparilla. Piirilevyn eri kerrokset ja muut kuvat on esitelty liitteessä 5.

Prototyypin piirilevyt tilattiin Beta Layout Ltd:stä, Irlannista. Työtä varten ADIO1:n piirilevyjä on kasattu käsin juottamalla kaksi kappaletta. Komponenttien lukumäärä yhdellä ADIO1:n piirilevyllä on 262 kappaletta. Valmiiksi kasatun ADIO1:n piirilevy on esitetty kuvissa 4.4 ja 4.5.



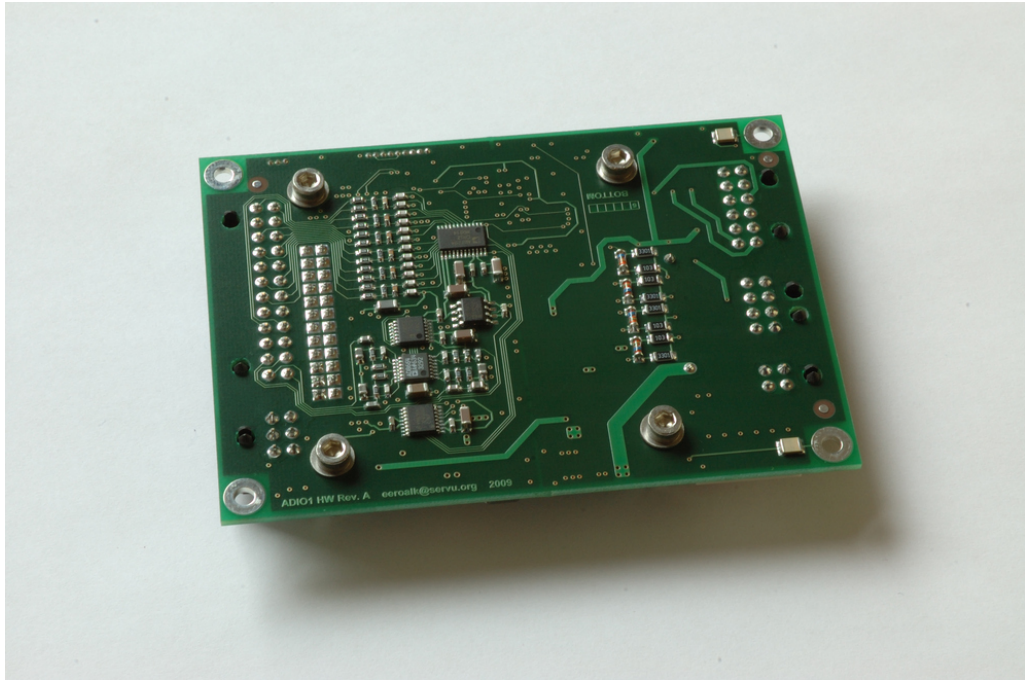
Kuva 4.4: ADIO1:n piirilevy yläpuolelta

4.3.8 Mekaaninen rakenne

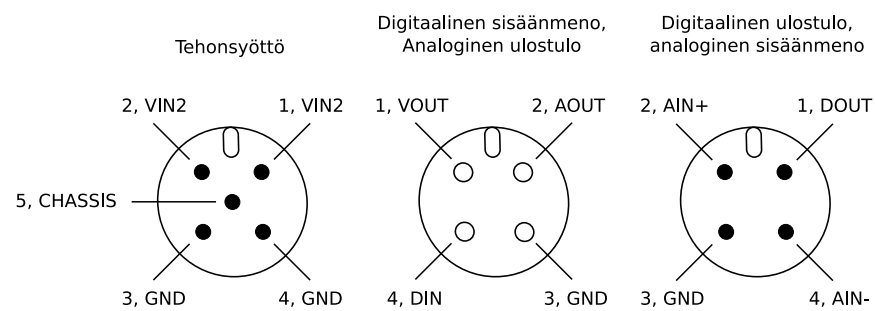
ADIO1:n prototyypit on koteloitu Fiboxin valmistamiin AL081806-tyyppisiin alumiinikoteloihin, jotka tarjoavat erinomaisen vesitiiviyyden ja suojan sähkömagneettisia häiriöitä vastaan. Piirilevyt on kiinnitetty Fiboxin asennuslevyille M3-kuusiokoloruuveilla ja 3 mm korkeilla muovisilla korotuspaloilla. 1553TRC-moduulit on kiinnitetty ADIO1-kortteihin 12 mm korkeiden ruuvitornien avulla. Ruuvitornien molemmissa päissä on M3-kierteet, joten levyt on kiinnitetty molemmilta puolilta M3-kuusiokoloruuveilla. Ruuvikiinnityksissä on käytetty aluslaattoja ja jousialuslaattoja pitävyyden varmistamiseksi.

Tässä työssä ainoastaan digitaalisilla sisäänmenoilla ja ulostuloilla oli merkitystä koelaitteiston mittausten kannalta, joten ADIO1:n kotelon liitännät on suunniteltu tätä ajatellen. Neljä digitaalista sisäänmenoa on kytketty teollisuudessa yleisiin naaraspuolisiin M12-liittimiin, joita on yksi sisäänmenoa kohden. Kotelon koon tuomien rajoitteiden vuoksi neljästä digitaalisesta ulostulosta on kytketty ainoastaan kaksi urospuolisiin M12-liittimiin. Jäljelle jääneet M12-liittimien pinnit on kytketty analogisiin liitäntöihin kuvan 4.6 mukaisesti.

ADIO1:n kahdennettu tehonsyöttö kytketään viisinapaiseen M12-liittimeen kuvan 4.6 mukaisesti. Viides johdin on kytketty kotelon runkoon. Kahdennettu MIL-STD-



Kuva 4.5: ADIO1:n piirilevy alapuolelta



Kuva 4.6: ADIO1:n M12-liittimien kuvaukset

1553-väylä liitetään Trompeterin valmistamiin BJ71-runkoliittimiin, joista lähtee noin 50 mm pitkät kierretyt johtimet 1553TRC-moduulin liittimiin. ADIO1:n LED-liittimestä J8 lähtee johtimet kaksivärisen lediin, joka on kiinnitetty kotelon kyljessä olevaan vedenpitävään pitimeen. Koteloitu ADIO1 on esitetty kuvassa 4.7.

4.4 Väyläohjain (TRC-ADA)

4.4.1 Toiminta-ajatus ja rakenne

Koelaitteistossa väyläohjaimen tarkoituksena on välittää hajautettujen IO-yksiköiden välisiä viestejä mahdollisimman tehokkaasti, jotta järjestelmä olisi



Kuva 4.7: ADIO1 koteloituna

vasteajoiltaan nopea. Suorituskykytesteissä väyläohjaimelta vaaditaan hyvin yksinkertaista toiminnallisuutta, sillä tarkoitus on ainoastaan siirtää rekisterien sisältöä etäterminaalilta toiselle. Alunperin tässä työssä oli tarkoitus käyttää väyläohjaimena GE/Fanucin valmistamaa PCI-liitäntäistä MIL-STD-1553-korttia ja UNIX-tietokonetta, mutta vientilisenssiongelmien vuoksi kortin laitteistoajurit saatiin työn kannalta liian myöhään. Väyläohjain päätettiin siten toteuttaa alunperin väyläliityntämoduulien testaukseen tarkoitetulla TRC-ADA:lla sekä 1553TRC:llä.

TRC-ADA on yksinkertainen adapterikortti, joka tarjoaa väyläliityntämoduulille tehonsyötön sekä käyttäjälle mikrokontrollerin kautta RS-232-liittymän. Käytännössä laitteen MIL-STD-1553-toiminnallisuus tapahtuu 1553TRC:ssä ja alijärjestelmällä (TRC-ADA:lla) ainoastaan konfiguroidaan väyläohjainta. TRC-ADA:n kytkentäkaavio on esitetty liitteessä 7 ja komponenttilistaus puolestaan liitteessä 9.

4.4.2 Mikrokontrolleri

Tässä työssä TRC-ADA:n tarkoituksena oli tarjota ainoastaan testialusta 1553TRC-moduulille sekä toimia MIL-STD-1553-väyläohjaimen käyttöliittymälaitteistona. Toisin sanoen, prosessorointikapasiteetin vaatimukset olivat varsin vähäiset. TRC-ADA:n mikrokontrolleriksi valittiin Atmelin 8-bittisen AVR-sarjan ATmega644P,

jossa on 64 kilotavua Flash-muistia ohjelmakoodille, 4 kilotavua SRAM-muistia sekä muun muassa kaksi USART-lohkoa sarjaliikenteelle [8].

ATmega644P:n suurin kellotaajuus 3,3 voltin käyttöjännitteellä on 10 MHz, mutta asynkronisen sarjaliikenteen vaatimusten vuoksi ulkoisen oskillaattorin (U7) taajuudeksi valittiin 7,3728 MHz [8]. Oskillaattorin käyttöjännitesyöttö on suodatettu ferriittikomponentilla L2 ja 100 nF:n keraamisella kondensaattorilla radiotaajuuksien häiriöiden vähentämiseksi. National Semiconductorsin valmistama LM809 (U4) on jännitevalvontapiiri, joka pitää mikrokontrollerin reset-linjan aktiivisena käyttöjännitteiden kytkentävaiheessa. Jännitevalvontapiiriin ja ISP-ohjelmointiliitännän samanaikainen reset-linjan ohjaaminen mahdollistetaan vastuksella R1.

Mikrokontrollerin ohjelmakoodin lataaminen tapahtuu niin sanotun ISP-liitännän (In-System Programming) kautta, joka on tuotu liittimeen J3. Mahdollista tulevaa käyttöä varten TRC-ADA:n laajennusliittimeen J5 on tuotu neljä mikrokontrollerin IO-linjaa, käyttöjännite ja maa.

4.4.3 Liitynnät

TRC-ADA:n moduuliliitynnän RS-422-sarjakommunikaatio on toteutettu Texas Instrumentsin SN65HVD30-piirillä, jonka differentiaaliset signaalit on terminoitu kahdella 120 ohmin vastuksella (R2 ja R3). RS-422-kytkentä on liitetty mikrokontrollerin USART0-lohkoon. Sarjaliitynnän ja käyttöjännitteen lisäksi moduuliliitynnälle tuodaan keskeytys- ja ohjaussignaalit. [55]

Laitteen RS-232-liityntä on tehty Analog Devicesin valmistamalla ADM3202-puskuripiirillä (U6), joka liittyy mikrokontrollerin USART1-lohkoon. Piirin ympärillä olevat 100 nF:n keraamiset kondensaattorit ovat RS-232:n jännitetasot generoivia varauspumppuja varten. Sarjaportti on suojattu pintaliitettävillä PTC-vastuksilla ja Ceradiode-ylijännitesuojilla, jotka aktivoituvat niiden välisen jännitteen ylittäessä 15 voltia.

TRC-ADA:n toimintatilan indikoimista varten liittimeen J6 on tuotu ulkoisen ledin ohjaus, joka tapahtuu suoraan mikrokontrollerin ulostulolla 220 ohmin etuvastuksen kautta. Samassa J6-liittimessä on myös painikesisäänmeno, jossa on vastuksella R8 ja Ceradiode-komponentilla D5 toteutettu ESD-suojaus.

4.4.4 Tehonsyöttö

TRC-ADA:n kytkentä tarvitsee kaksi sisäistä käyttöjännitettä: 3,3 V ja 5,0 V. Laitteen syöttöjännitteestä tehdään 5 voltia National Semiconductorsin LM2592HV-hakkuripiiriin (U1) perustuvalla kytkennällä. LM2592HV on 150 kHz:n taajuudella toimiva hakkuriohjain, johon on integroitu 2 ampeerin kytkin-MOSFET. TRC-ADA:ssa käytetään LM2592HV:n kiinteän ulostulojännitteen versiota, jolloin lähtöjännitteeksi saadaan 5 voltia ilman ulkoisia takaisinkytkentävastuksia. Buck-tyyppisen hakkurin kela (L1) ja ulostulon kondensaattori (C2) on mitoitettu valmistajan datalehden suositusten mukaisesti siten, että jatkuva ulostulovirta olisi 2 ampeeria. LM2592HV on sisäisesti kompensoitu, joten muita komponentteja ei itse hakkurikytkentään tarvita. [33]

Teholähdekytkennän sisäänmeno on suojattu ylijännitettä ja -virtaa vastaan. Transil-komponentti SM15T39CA (TRG1) aktivoituu sisäänmenojännitteen ylitäessä 39 voltia, jolloin myös Polyfuse-tyyppinen palautuva sulake (FU1) aktivoituu. Schottky-diodi D2 suojaa sisäänmenoa väärältä syöttöjännitteen polariteetilta. Hakkurikytkennän aiheuttamia eromuotoisesti kytkeytyviä häiriöitä suodatetaan Muratan LC-alipäästösuotimella (LC1) ja sen molemmiin puolin olevilla 2,2 μF :n keraamisilla kondensaattoreilla. Sisäänmenon suodinkondensaattorina on 330 μF :n elektrolyyttikondensaattori (C1).

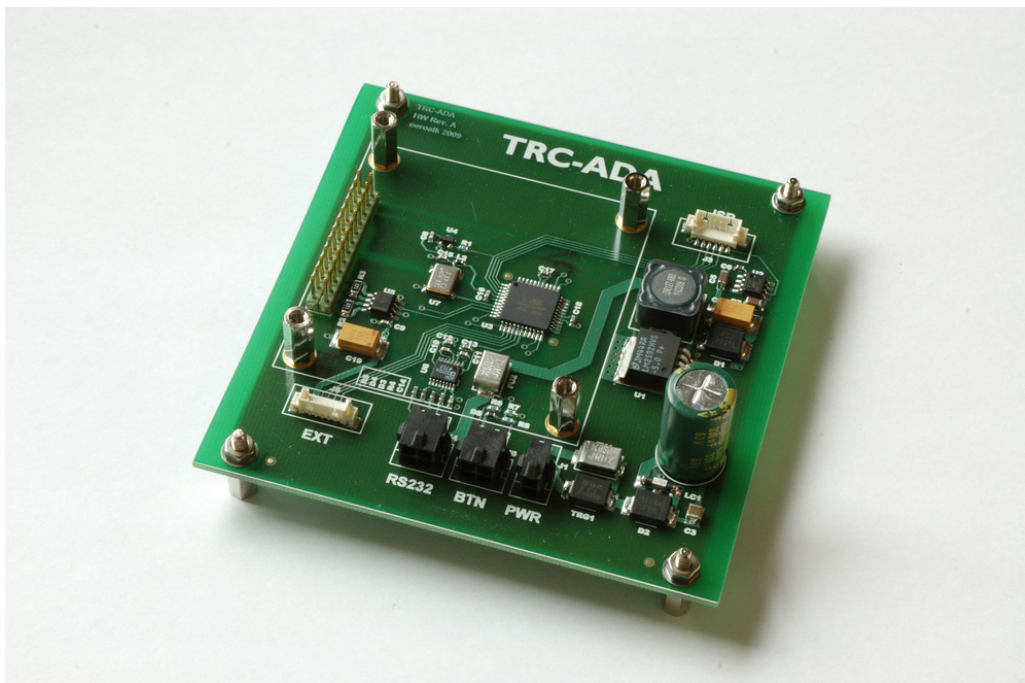
Mikrokontrollerin ja sen oheispiirien tarvitsema 3,3 voltin käyttöjännite reguloidaan lineaarisesti National Semiconductorsin LM2989-regulaattoripiirillä (U2). Piirin sisäänmenon ja ulostulon suotoa varten kytkennässä on 10 μF :n keraamiset kondensaattorit, ja ulostulorippelin vähentämiseksi piirin BYPASS-pinnistä maahan on kytketty 10 nF:n keraaminen kondensaattori. 3,3 voltin käyttöjännitteen suodossa on lisäksi 220 μF :n tantaalikondensaattori, joka on piirilevyllä sijoitettu laajennusliittimen (J5) viereen. [34]

4.4.5 Piirilevysuunnittelu

TRC-ADA:n piirilevy on suunniteltu kaksipuoleiseksi, sillä kytkennän johdinvetojen määrä on vähäinen. Piirilevyn kooksi valittiin 100 x 100 mm, jotta se sopisi tarvittaessa Boplan valmistaman alumiinikotelon kiinnitysuriiin. Piirilevyn neljässä nurkassa on lisäksi 3 mm:n reiät vaihtoehtoiselle asennustavalle.

Piirilevyn kaikki mahdollinen johdotus on pyritty tekemään yläpuolisella kuparilla, jotta alapuolelle jäisi mahdollisimman yhtenäinen maataso. Alapuoliselle kuparille jouduttiin tekemään yhdeksän johdinvetoa, mutta maataso on siitä huolimatta varsin yhtenäinen. Pintaliitettävän hakkuripiirin U1 jäähdytys maatasokupariin toteutettiin usealla vierekkäisellä läpiviennillä, jotka siirtävät lämmön yläpuoliselta kuparilta tehokkaasti levyn alapuolen maatasoon. Piirilevyn kuparikerrokset ja muut kuvat on esitetty liitteessä 8.

TRC-ADA:n prototyypilevyt tilattiin Olimex Ltd:stä Bulgariasta ja niitä kasattiin työtä varten käsin juottaen kaksi kappaletta. Piirilevyllä on komponentteja yhteensä 51 kappaletta. Valmiiksi kasatun TRC-ADA:n piirilevy on esitetty kuvassa 4.8.



Kuva 4.8: TRC-ADA:n piirilevy

4.4.6 Mekaaninen rakenne

TRC-ADA on koteloitu Boplan valmistamaan ABP1000-mallin alumiinikoteloon. Vaikka tässä työssä TRC-ADA toimii 1553TRC-moduulin kanssa vain väyläohjaimena, ohjelmistomuutoksilla samaa laitteistoa voisi käyttää myös muihin käyttötarkoituksiin – esimerkiksi vianhakuun monitorointitilaa hyödyntäen. Kotelo onkin valittu juuri tällaisia käyttötarkoituksia ajatellen, eikä niinkään kiinteästi asennettavalle väyläohjaimelle. Kuvassa 4.9 on esitetty koteloitu väyläohjain.

Laitteen tehonsyöttöön käytetään MIL-DTD-5015-sarjan kaksinapaista liitintä (MS3102E10SL-4P), joka puolestaan liittyy TRC-ADA:n piirilevyyn AMP:n Micro Mate-n-Lok -liittimellä. RS-232-liitäntää varten laitteen etupaneelissa on nelinapainen MIL-DTL-26842-sarjan liitin (MS3112E-8-4S). Etupaneelissa on myös integroidun ledin sisältävä painonappi, jonka avulla voidaan siirtyä väyläohjaimen konfigurointitilaan. MIL-STD-1553-väyläliitynnälle on kaksi Trompeter Electronic-sin BJ72-liitintä. Tehonsyötön tapaan kaikki muutkin sisäiset liitännät on tehty Micro Mate-n-Lok -liittimin.



Kuva 4.9: TRC-ADA koteloituna

4.5 Väyläkaapelointi

4.5.1 Yleistä

MIL-STD-1553 ei määritä väyläkaapelointia kovinkaan tarkasti, kuten jo kappaleessa 2.3 on todettu. Standardin mukaan kaapelointi tulee tehdä suojatulla ja kierretyllä parikaapelilla, jonka ominaisimpedanssin on 78 ohmia. MIL-STD-1553B ei rajaa väyläkaapelin enimmäispituutta, joten se määräytyy kaapelin kapasitanssin ja siirtoviiveiden myötä. Käytännössä väylän pituus voi olla enintään muutamia satoja metrejä. [14, s. 10]

Väylä tulee terminoida molemmista päistä kaapelin nimellisimpedanssia vastaavilla terminaattoreilla, joiden tarkoituksena on vähentää signaalin heijastuksia ja siten särröä. MIL-STD-1553:n jopa yli kymmenen voltin amplitudin vuoksi terminaattorien tulee olla mitoitettuja muutaman watin teholle [14, s. 17]. Käytännössä terminaattori on vastus, jolla on mahdollisimman pieni reaktanssi.

MIL-STD-1553 ei määrää eikä suosittele mitään tiettyjä liittimiä käytettäväksi, mutta vuosien aikana tietyt liitintyypit ovat vakiintuneet tavanomaisiksi vaihtoehtoiksi. Trompeter Electronicsin valmistamat TRB-tyyppiset triaksiaaliliittimet ovat kenties yleisin vaihtoehto niin maajärjestelmissä kuin aluksissakin. Muita MIL-STD-1553:n kanssa yleisesti käytettyjä liitintyyppejä ovat esimerkiksi MIL-DTL-38999 ja D-liitin [32].

4.5.2 Testikaapelointi

Tämän työn testikaapelointi tehtiin käyttäen Trompeter Electronicsin 70-sarjan TRB-triaksiaaliliittimiä sekä nimellisimpedanssiltaan 78-ohmista Belden 9272-kaapelia. Kaapeli on johdinkapasitanssiltaan 65 pF/m ja eristysmateriaaliltaan PVC-muovia, joten se soveltuu lähinnä normaaleihin käyttöolosuhteisiin. Liittimet valittiin siten, että liitettävyyys mittalaitteisiin tapahtuisi vaivattomasti ilman adaptereita ja toisaalta siksi, että valittu liitintyyppi on kenties kaikkein yleisin. Kaikki välikaapelit valmistettiin työtä varten itse.

Laitteet liittyivät väylään suoraan haaroittimien kautta, eli esimerkiksi ilma-aluksissa tyyppillistä muuntajaliityntää (transformer coupled) ei käytetty. Testikaapeloinnissa käytetyt haaroittimet olivat Trompeter Electronicsin valmistamia ja tyyppiltään TN2A. Haaroittimen urospuoleinen liitin kytkettiin suoraan laitteen naaraspuoleiseen runkoliittimeen, ja kaapelit liitettiin haaroittimen kahteen naaraspuoleiseen liittimeen. Tällä tavoin haarautuman pituus jäi selvästi alle standardin määräämästä 305 mm:stä.

Testikaapeloinnin terminointiin käytettiin niin ikään Trompeter Electronicsin valmistamia 78-ohmisia terminaattoreita tyyppiltään TNG-1-78. Erinäisiä testijärjestelyitä varten kaapeleita yhdistettiin tarvittaessa AD78-tyyppisillä adaptereilla.

4.5.3 Käytännön kaapelointi

Mikäli MIL-STD-1553-pohjaisia automaatiolaitteita alettaisiin soveltamaan teollisuuteen laajemminkin, tulisi väyläkaapelointia yksinkertaistaa asennettavuuden helpottamiseksi ja kustannusten vähentämiseksi. Testikaapeloinnissa käytetyt liittimet ovat monin tavoin hyviä ja luotettavia, mutta niiden asentaminen kaapeleihin kenttäolosuhteissa on hyvin työlästä. Vaikka kaapeloinnissa tyydyttäisiin valmiisiin väyläkaapeleihin, olisi niiden hinta muunlaisiin väyläkaapelointeihin verrattuna varsin suuri.

Testikaapeloinnissa käytetty Belden 9272 soveltuisi myös käytännön väyläkaapelointiin normaaleissa teollisuusolosuhteissa. Kaapelin lämpötilankeston yläraja on 60 °C, joten sen ylittyessä kaapeli tulisi vaihtaa jonkin verran kalliimpiin teflon-eristeisiin vaihtoehtoihin.

Teollisuudessa käytetään laajalti M12-liittimiä signaalien, datan ja tehon siirtoon. M12-liittimet soveltuisivat myös hyvin MIL-STD-1553:n kanssa käytettäväksi, vaikka ne eivät olekaan sähköisiltä ominaisuuksiltaan triaksiaaliliittimien veroisia. Helposti asennettava ja kustannuksiltaan kohtuuhintainen ratkaisu syntyisi siten, että väylän haaroitus tehtäisiin laitteen sisällä ja väyläkaapelit tuotaisiin suoraan laitteen M12-runkoliittimiin.

5. OHJELMISTO

5.1 Laitteiston ohjelmistokehitys

IEC 61508 -standardin kolmas osa ohjeistaa, miten turvateknisten laitteiden ohjelmistokehitys tulisi tehdä. Ohjelmiston toiminnallisten vaatimusten lisäksi standardi määrittelee muun muassa, millaista ohjelmistotuotannon mallia tulisi käyttää ja miten ohjelmistoa tulisi testata. [27]

Tässä työssä ohjelmisto on kehitetty ilman ohjelmistotuotannollisia menetelmiä siten, että lopputulos olisi kuitenkin mahdollisimman toimiva, luotettava ja monipuolinen. Käytettävissä olevilla resursseilla IEC 61508-3:n mukainen ohjelmistotuotantoprosessi ei olisi ollut realistinen eikä ylipäättänsä tarkoituksenmukainen. Laitteiden ohjelmistoa on testattu kriittisimpien toimintojen osalta yksikkötesteillä sekä kattavalla järjestelmätestauksella.

5.2 TRCCOMM-protokolla

5.2.1 Kuvaus ja tarkoitus

Laitteiden MIL-STD-1553-liityntä on hajautettu omaksi itsenäiseksi moduulikseen, joka liittyy alijärjestelmiin TRC:ksi kutsutulla rajapinnalla. Väyläliityntämoduuli kommunikoi alijärjestelmän kanssa RS-422-tyyppisellä sarjaliikenteellä, jonka enimmäisnopeus on noin 3,7 Mb/s. Kommunikaatiota varten piti kehittää protokolla, joka nimettiin TRCCOMM:ksi.

Protokollan toteutuslähdekohdaksi valittiin isäntä-renkiperiaate, jossa isäntä aloittaa aina kommunikaation ja renki vastaa isännän viesteihin. TRCCOMM:n viestiliikenne on binaarimuotoista, jotta tiedon käsittely olisi mahdollisimman nopeaa ja hyötysuhde hyvä. Isännän lähettämän viestin ensimmäinen tavu on viestikoodi, jonka avulla viestin tyyppi voidaan identifioida. Viestikoodin jälkeiset tavut

määräytyvät viestityypin perusteella, mutta viestin päättää aina kahdeksanbittinen CRC-tarkistussumma. TRC:n sarjaliikenteessä käytetään lisäksi pariteettibittä, jonka avulla suurin osa virheellisistä paketeista voidaan hylätä jo ennen CRC:n tarkistamista. TRCCOMM-protokollassa viestit erotellaan toisistaan vähintään neljän merkin mittaisella tauolla, joten saman viestin lähetys tulee tapahtua ilman taukoja.

TRCCOMM-protokollan viestityypit, tilakoodit ja muu toteutukseen liittyvä tekninen tieto on esitetty liitteessä 10. Protokollan toiminta käydään tarkemmin läpi seuraavissa kappaleissa.

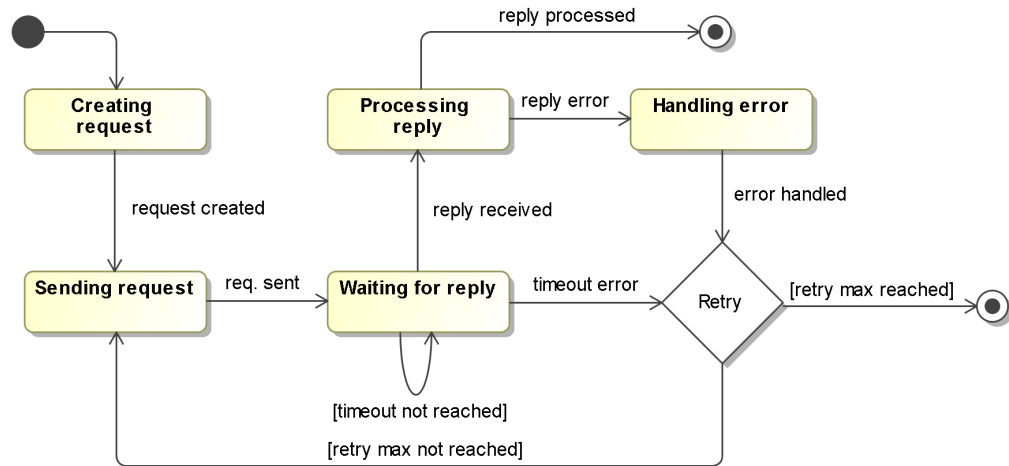
5.2.2 TRCCOMM alijärjestelmässä (isäntä)

Alijärjestelmä toimii TRCCOMM-protokollassa isäntänä, joka aloittaa kaikki tiedonsiirrot väyläliityntämoduulin kanssa. Kuvassa 5.1 on protokollan alijärjestelmäpuolen tilakaavioesitys UML-muodossa (Unified Modeling Language) [19, s.101].

Ennen varsinaista tiedonsiirtoa alijärjestelmä luo halutun komennon mukaisen viestin *trccomm_req_xx()*-funktioilla, jossa *xx* on viestikoodi heksadesimaalimuodossa. Funktio *trccomm_req_xx()* parametrin riippuvat viestikoodista. Edellisessä funktiossa muotoiltu viesti lähetetään väyläliityntämoduulille *trccomm_transmit_frame()*-funktioilla, jonka jälkeen silmukassa tarkistetaan *trccomm_receive_frame()*-funktion paluuarvoa. Mikäli paluuarvo muuttuu nolasta poikkeavaksi ennen aikakatkaisua, on väyläliityntämoduulilta saatu vastausviesti. Tässä vaiheessa vastausviestin oikeellisuutta ei ole vielä tarkistettu ja se annetaan *trccomm_req_process_frame()*-funktion käsiteltäväksi. *Trccomm_req_process_frame()* tarkistaa ensimmäiseksi viestin CRC-tarkisteen *trccomm_crc8*-funktioilla, jonka jälkeen kutsutaan viestikoodin mukaisesti *trccomm_req_xx()*-funktioita. Viestikoodikohtaisessa käsittelyfunktiossa tehdään vielä mahdollisia tarkistuksia ennen vastausviestin hyväksymistä.

Mikäli väyläliityntämoduuli ei vastaa alijärjestelmän lähettämään viestiin aikakatkaisuaajan sisällä, toistetaan kysely ilman virhekäsittelyä. Uudelleenyritysten määrä on konfiguroitavissa, ja tässä työssä on käytetty joko arvoa 1 tai 3. Jos *trccomm_req_process_frame()*-funktio tai viestikoodin mukainen käsittelyfunktio havaitsevat vastausviestin käsittelyssä jonkin virheen, siirrytään *trccomm_error()*-virhekäsittelyfunktioon. Teoriassa on mahdollista, että 1553TRC:n lähettämä

yli 16-tavuinen vastausviesti pilkkoutuu osiin. Näin voi käydä, mikäli MIL-STD-1553-väylältä vastaanotetaan viesti kesken sarjaliikennelähetyksen ja 1553TRC ei keskeytyksen vuoksi ehdi syöttämään dataa mikrokontrollerin 16 tavun kokoiseen FIFO-muistiin [38]. Tällaista virhetilannetta varten *trccomm_error()*-funktiossa odotetaan tietyn aikaa ja tyhjäetään vastaanotettavan datan sarjaliikennepuskuri ennen mahdollista uudelleenyritystä.



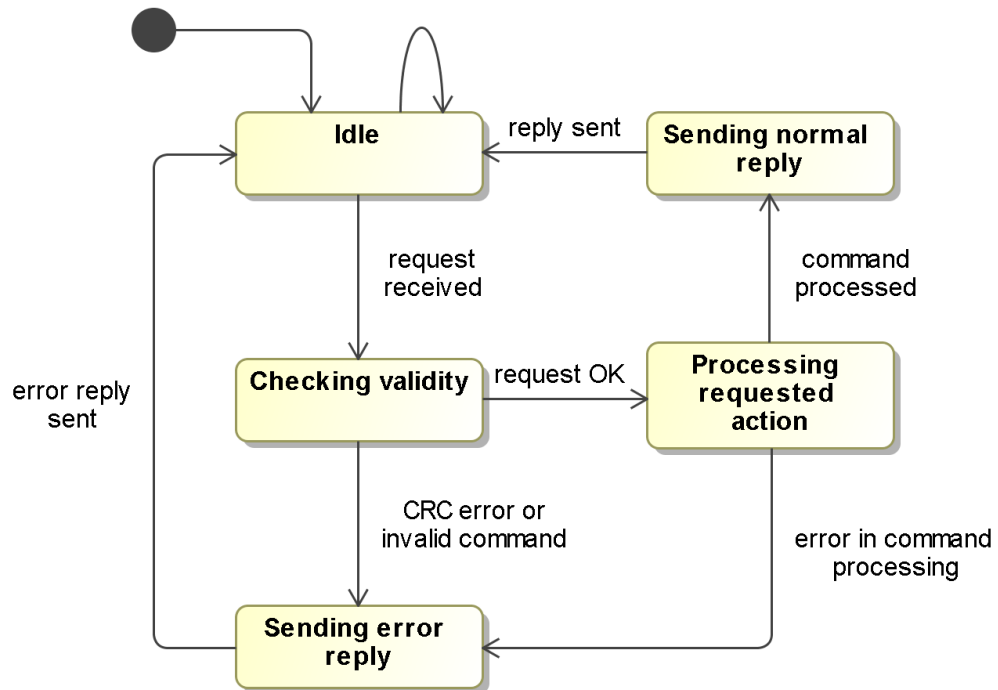
Kuva 5.1: TRCCOMM:n tilakaavio alijärjestelmässä

5.2.3 TRCCOMM väyläliityntämoduulissa (renki)

Väyläliityntämoduulissa TRCCOMM-protokolla ottaa vastaan viestejä alijärjestelmältä ja vastaa niihin. Kommunikaation aloittaa aina alijärjestelmä, joten väyläliityntämoduuli toimii renkinä. Viestinkäsittelyn UML-muotoinen tilakaavio väyläliityntämoduulin kannalta on esitetty kuvassa 5.2 [19, s.138].

Väyläliityntämoduulin pääohjelmassa kutsutaan *trccomm_receive_frame()*-funktioita jatkuvassa silmukassa. Funktio palauttaa vastaanotetun datan tavumäärän, ja sen ollessa nolasta poikkeava uusi viesti alijärjestelmältä on vastaanotettu käsiteltäväksi. *Trccomm_rep_process_frame()*-funktiossa tarkistetaan ensin viestin oikeellisuus CRC-tarkistussumman (*trccomm_crc8()*) ja viestikoodin osalta. Prosessointi siirretään viestikoodin mukaiselle käsittelyfunktiolle (*trccomm_rep_xx()*), jossa tehdään mahdollisia lisätarkistuksia ennen viestin hyväksymistä. Käsittelyfunktio palauttaa vastausviestin, joka voi sisältää dataa tai ainoastaan paluuarvon. Vastausviesti lähetetään alijärjestelmälle *trccomm_transmit_frame()*-funktion avulla, jonka jälkeen palataan takaisin pääohjelman silmukkaan.

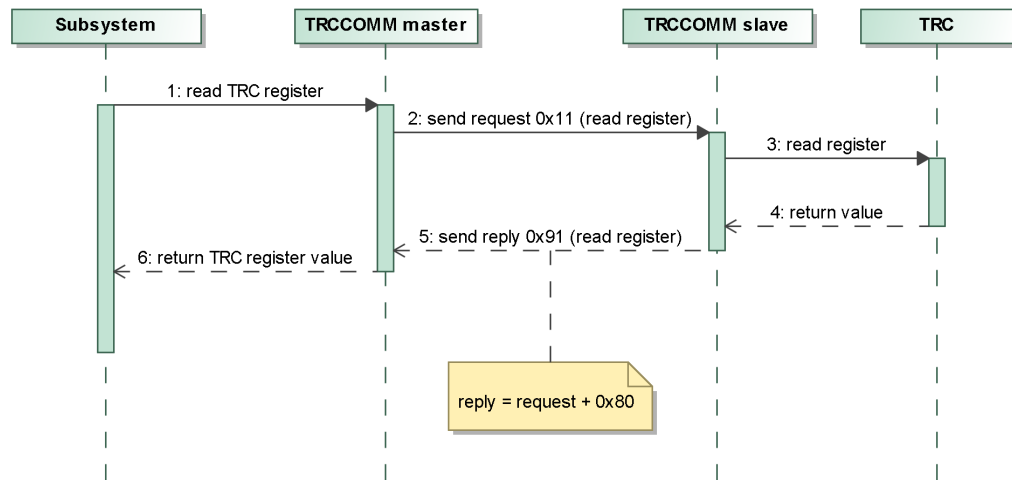
Mikäli TRCCOMM-kommunikaatiossa tapahtuu virhe, siitä ilmoitetaan aina alijärjestelmälle. Toisin sanoen, kaikki virheet – mukaan lukien CRC-tarkistussumman poikkeavuudet – johtavat virheen mukaisen tilakoodin palauttamiseen alijärjestelmälle. TRCCOMM-protokollan tilakoodit on listattu liitteen 10 kohdassa B.



Kuva 5.2: TRCCOMM:n tilakaavio väyläliityntämoduulissa

5.2.4 TRC:n ja alijärjestelmän kommunikaatio

TRCCOMM-protokollan toiminta 1553TRC:n rekisteriä luettaessa on esitetty kuvan 5.3 tapahtumasekvenssikaaviossa. Kuvassa protokollatoteutukset ja laitteet on erotettu toisistaan havainnollistamisen vuoksi, vaikka todellisuudessa ne ovat samaa ohjelmistoa. Vaiheessa 1 alijärjestelmällä (subsystem) on tarve lukea väyläliityntämoduulin (TRC) rekisterin sisältö. Alijärjestelmän protokollatoteutus (TRCCOMM master) tekee vaiheessa 2 viestikoodi 0x11:n mukaisen kyselyn väyläliityntämoduulille. Vaiheessa 3 viesti prosessoidaan väyläliityntämoduulissa, ja rekisterin arvo palautetaan protokollatoteutukselle (TRCCOMM slave) vaiheessa 4. Vastauksen viestikoodiin lisätään 0x80 ja vastausviesti lähetetään alijärjestelmälle vaiheessa 5. Vastausviestin käsittelyn jälkeen rekisterin sisältö on alijärjestelmän käytettävissä vaiheessa 6.



Kuva 5.3: Tapahtumasekvenssikaavio rekisterin lukemisesta TRCCOMM-protokollalla

5.3 Väyläliityntämoduuli (1553TRC)

5.3.1 Valitut toteutustavat

1553TRC ei ole itsenäinen laite, vaan moduuli, joka liittyy aina johonkin alijärjestelmään. Tämän hajautetun rakenteen vuoksi 1553TRC:n ohjelmisto on tehty mahdollisimman yleiskäyttöiseksi ja yksinkertaiseksi. MIL-STD-1553:n mikrosekuntiluokan reaaliaikavaatimusten takia etäterminaalitilassa moduuli toimii lähes täysin keskeytyksien ohjaamana. Väyläohjaintilassa MIL-STD-1553:n kommunikatio tapahtuu kyselylistakäsittelijässä.

Väyläliityntämoduulin ohjelmisto on kirjoitettu C-kielellä käyttäen kääntäjänä GNU-yhteisön GCC:tä ja kehitysympäristönä Rowley'n Crossworksiä. David A. Wheelerin SLOCCount-ohjelmalla laskettuna 1553TRC:n ohjelmakoodia on 3429 rivin verran, ja käännettynä ohjelma vie mikrokontrollerin Flash-muistia 31,5 kB. Suuren rivimäärän vuoksi 1553TRC:n lähdekoodeja ei esitetä liitteenä, vaan ainoastaan sähköisessä muodossa.

5.3.2 Laitteistorajapinnat

Kuten kappaleessa 4.2.3 on todettu, liittyy HI-6110-viestiprosessori mikrokontrolleriin 16-bittisellä dataväylällä, joka on laitteistorajoitteiden vuoksi jaettu kahteen kahdeksan bittiä leveään osaan. Tästä aiheutuu ylimääräisiä bittien siirtooperaatioita, jotka tehdään *hi6110_regwrite()*- ja *hi6110_regread()*-funktioissa.

Funktioissa tapahtuvat myös osoiteväylän asettaminen sekä muut dataväylän käyttöön liittyvät IO-operaatiot. LPC2194-mikrokontrolleri tarjoaa perinteisen IO-rajapinnan lisäksi myös noin 3,5 kertaa nopeamman rekisterirajapinnan (Fast GPIO), jota on 1553TRC:n ohjelmakoodissa hyödynnetty [38].

MIL-STD-1553B-standardi vaatii, että etäterminaalin osoite tulee olla välillä 0 – 30 ja että väylällä ei saa olla useampia laitteita samalla osoitteella [59, 4.3.3.5.1.1]. Läheinnä Yhdysvaltain ilmavoimille tehty MIL-STD-1553B Notice 2 -dokumentti täsmentää, että etäterminaalin osoite tulisi asettaa osoitteen mukaisesti langoitettulla ulkoisella liittimellä [60, 30.3]. Vaatimus on avioniikkajärjestelmissä perusteltu, mutta teollisuusympäristöön se ei sovellu kovin hyvin. 1553TRC:n osoite konfiguroidaan ohjelmallisesti mikrokontrollerin ulostuloilla *hi6110_set_rtaddr()*-funktiota kutsumalla. Käytännössä etäterminaalin osoite siirtyy TRCCOMM-protokollan avulla alijärjestelmältä, kuten esimerkiksi ADIO1:ltä.

Viestiprosessori tukee neljää eri toimintatilaa (väyläohjain, etäterminaali, monitorointi ja monitorointi etäterminaaliosoitteella), joista tässä työssä on toteutettu väyläohjain ja etäterminaali [23]. Toimintatila vaihdetaan *hi6110_change_mode()*-funktiolla, jonka myötä HI-6110 alustetaan valmistajan ohjeistuksen mukaisesti. Funktion *hi6110_change_bus()* avulla aktiivinen väylä voidaan vaihtaa sekä väyläohjain- että etäterminaalityloissa. Jokaisen viestityypin käsittelyyn on omat erilliset funktionsa, jotka ovat toimintatilakohtaisia. Funktiot on toteutettu HI-6110:n datalehden ja MIL-STD-1553-standardin perusteella, eikä niitä käydä tässä työssä yksityiskohtaisesti läpi.

1553TRC kommunikoi alijärjestelmän kanssa kappaleessa 5.2 kuvattua TRCCOMM-protokollaa käyttäen. Kommunikaatio tapahtuu mikrokontrollerin yleiskäyttöisen sarjaliikennelohkon (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART) avulla. LPC2194:n UART-lohko sisältää 16-tavuiset lähetys- ja vastaanottopuskurit, joiden avulla sarjaliikenteen mikrokontrollerille aiheuttamien keskeytysten määrää voidaan oleellisesti vähentää ja siten parantaa suorituskykyä [38]. Keskeytysfunktiossa *uart0_isr()* on toteutettu sekä lähetettävän että vastaanotettavan sarjaliikenteen käsittely käyttäen UART-lohkon FIFO-puskureita sekä ohjelmallisia rengaspuskureita. Moduuliliittynnän sarjaliikennenopeudet voivat olla 9600, 115200, 921600 tai 3686400 b/s, ja nopeuden muutos tapahtuu *trc_status*-tietueen muuttujan *commode* perusteella *uart_init()*-funktiossa.

5.3.3 MIL-STD-1553-väyläohjain

1553TRC:n ollessa väyläohjaintilassa kaikki toiminta tapahtuu kyselylistaa suoritettamalla. Väyläohjaimen toiminnot kirjoitetaan *ms1553_bclist*-tietueesta muodostuvaan kyselylistaan eräänlaisina tulkattavina komentoina, joiden avulla voidaan toteuttaa monimutkaisiakin tehtäviä. MIL-STD-1553:n standardin mukaisten viestityyppien lisäksi kyselylistassa voidaan käyttää muun muassa hyppy- ja vertailukomentoja. 1553TRC:n kyselylistakomennot on esitelty tarkemmin taulukossa 5.1, ja kyselylistatietueen rakenne on kuvattu alla olevassa listauksessa.

```

1 struct ms1553_bclist_s
2 {
3     unsigned char src_addr;
4     unsigned char dest_addr;
5     unsigned char src_subaddr;
6     unsigned char dest_subaddr;
7     unsigned char cmd;
8     unsigned short optdata;
9 };

```

Väyläohjaintilassa kyselylistaa suoritetaan pääohjelmasta kutsuttavan funktion *ms1553_bcmode_handler()* avulla. Tietueen *ms1553_status* muuttuja *bc_list_pos* toimii kyselylistan osoittimena, ja se siis kertoo kulloinkin suoritettavan komennon. Ennen komennon suorittamista tarkistetaan kyselylistatietueen parametrien oikeellisuus muun muassa sallittujen osoitealueiden osalta. Seuraavaksi suoritetaan komento ja kasvatetaan *bc_list_pos*-muuttujan arvoa yhdellä. Mikäli MIL-STD-1553-komento palauttaa virheen, komentoa yritetään uudestaan alla olevan yksinkertaistetun ohjelmakoodin mukaisella logiikalla.

```

1 for (i=0; i<(MS1553_BC_TRY_PRIMARY + MS1553_BC_TRY_ALTERNATE); i++)
2 {
3     if (hi6110_bcmode_xxxx(...))
4     {
5         if (i == (MS1553_BC_TRY_PRIMARY - 1) && hi6110_bus == 0 &&
6             MS1553_BC_TRY_ALTERNATE > 0)
7         {
8             //changing bus for alternate bus retries, A->B
9             hi6110_change_bus(1);
10        }
11        else if (i == (MS1553_BC_TRY_PRIMARY - 1) &&
12                hi6110_bus == 1 && MS1553_BC_TRY_ALTERNATE > 0)
13        {
14            //changing bus for alternate bus retries, B->A
15            hi6110_change_bus(0);

```



```

16     }
17     else if (i == (MS1553_BC_TRY_PRIMARY + MS1553_BC_TRY_ALTERNATE - 1))
18     {
19         //the whole transaction missed
20         status->bc_mistransact++;
21     }
22 }
23 else
24 {
25     //reply OK
26     break;
27 }
28 }

```

MIL-STD-1553B-standardi ei määrittele miten kaksoisredundanttisuutta hyödynnetään virhetilanteissa. Standardin sovellusopas MIL-HDBK-1553A käsittelee asiaa kappaleessa "50.6.2.1 Automatic retries", jossa todetaan yleisimmän tavan olevan yhden uudelleenyrityksen tekeminen toiselle väylälle [61, 50.6.2.1]. Saman sovellusoppaan esimerkkijärjestelmissä uudelleenyritysten toteutus vaihtelee paljon, joten 1553TRC:stä tehtiin mahdollisimman monipuolisesti konfiguroitava. Esikäänösvaiheessa sijoitettavilla vakioilla *MS1553_BC_TRY_PRIMARY* ja *MS1553_BC_TRY_ALTERNATE* määritellään MIL-STD-1553-komentojen suoritussytysten määrät ensisijaiselle ja toissijaiselle väylälle. Tässä työssä molempien vakioden arvot olivat 3. Mikäli etäterminaali on vioittunut siten, ettei se vastaa uudelleenyrityksiin, komento ohitetaan ja siirrytään seuraavaan. Kyselylistaohjelmien avulla on mahdollista toteuttaa pysyvästi vikaantuneen laitteen ohitus, jotta se ei aiheuttaisi toistuvasti virheitä väyläohjaimen toimintaan.

Väyläohjaimen kyselylistoja on tarkoitus hyödyntää siten, että ne laaditaan ennalta kuhunkin järjestelmään soveltuviksi ja että samaa listaa toistetaan nopeassa silmukassa hyppykäskyjä (JMP) käyttäen. 1553TRC:lle on myös mahdollista injektoida TRCCOMM-rajapinnan kautta yksittäisiä komentoja, jotka suoritetaan ennen vuorossa olevia kyselylistan komentoja. Toiminto kuvaillaan yleisellä tasolla MIL-HDBK-1553A-sovellusoppaan kohdassa "50.6.2.2 Asynchronous message insertion" [61, 50.6.2.2]. Injektoitu komento kirjoitetaan *ms1553_bclist*-tietuetaulun viimeiseen alkioon, jossa normaalisti on listan päättymiskomento (EOL). Funktion *ms1553_bcmode_handler()* alussa tarkistetaan tämän viimeisen alkion komento. Jos se eroaa EOL-komennosta, kopioidaan kyselylistan nykyinen osoitin *postmp*-muuttujaan ja muutetaan *ms1553_status*-tietueen *bc_list_pos*-muuttuja injektoidun komennon sijainniksi. Injektoitu komento suoritetaan normaalisti,

postmp-muuttujan arvo kopioidaan takaisin osoitinmuuttujaan ja *ms1553_bclist*-tietuetaulun viimeisen alkion komennoksi kirjoitetaan EOL. Seuraava kyselylistan komento suoritetaan normaalisti.

Taulukko 5.1: Kyselylistan komennot

Komento	Kuvaus
BCRT	MIL-STD-1553-tiedonsiirto väyläohjaimelta etäterminaalille
RTBC	MIL-STD-1553-tiedonsiirto etäterminaalilta väyläohjaimelle
MCC	MIL-STD-1553-moodikomento etäterminaalille
MCCDT	MIL-STD-1553-moodikomento etäterminaalin lähettämällä datalla
MCCDR	MIL-STD-1553-moodikomento datalla etäterminaalille
BBCRT	MIL-STD-1553-tiedonsiirto yleislähetysten etäterminaaleille
BMCC	MIL-STD-1553-moodikomento yleislähetysten etäterminaaleille
BMCCD	MIL-STD-1553-moodikomento data yleislähetysten etäterminaaleille
JMP	Hyppy sijaintiin
DLY	Viive (µs)
EOL	Kyselylistan päätöskomento, ei toimintaa
LD	Kirjoita arvo rekisteriin
CMP	Vertaa arvoa rekisteriin
CMPM	Vertaa bittimaskia rekisteriin
SBR	Aseta bittejä rekisterissä
CBR	Tyhjää bittejä rekisterissä
LEN	Aseta rekisterin pituus
CSW	Vertaa arvoa edellisen MIL-STD-1553-komennon paluuarvoon
CSWM	Vertaa bittimaskia edellisen MIL-STD-1553-komennon paluuarvoon

5.3.4 MIL-STD-1553-etäterminaali

Etäterminaalitilassa 1553TRC toimii keskeytysohjatusti eli MIL-STD-1553-väylältä tulevan viestin käsittely tapahtuu keskeytysfunktioissa. HI-6110-piirin RCVA- tai RCVB-ulostulo asetetaan aktiiviseksi, kun viestiprosessori vastaanottaa väylältä validin komentosanan ja etäterminaalin osoite vastaa komentosanan osoitetta. RCVA-ulostulo liittyy A-kanavaan, ja RCVB-ulostulo puolestaan sekundaariseen B-kanavaan. Ulostulot on kytketty mikrokontrollerin keskeytyssisäänmenoihin, jotka on etäterminaalitilan alustuksissa asetettu positiivisella reunalla keskeyttäviksi. Komentosanan vastaanoton jälkeen kutsutaan siis välittömästi joko funktiota *rcva_isr()* tai *rcvb_isr()* aktiivisena olevan kanavan perusteella. Näiden funktioiden toiminta on kanavan vaihtoa lukuun ottamatta identtinen, joten ainoastaan *rcva_isr()* käydään seuraavassa läpi.

Rcva_isr()-funktiossa tarkistetaan ensin, onko kanava A jo valmiiksi aktiivisena. Mikäli näin ei ole, vaihdetaan ensin aktiivinen kanava *hi6110_change_bus()*-funktiolla ja kasvatetaan *ms1553_status*-tietueen muuttujan *rt_buschange* arvoa yhdellä. Seuraavaksi kutsutaan funktiota *ms1553_rtmode_handler()*, jossa viesti varsinaisesti käsitellään.

Funktiossa *ms1553_rtmode_handler()* ensimmäiseksi luetaan viestiprosessorin rekisteristä 0x06 (message register) vastaanotetun viestin tyyppi ja kutsutaan sen perusteella viestin käsittelystä vastaavaa funktiota. Esimerkiksi väyläohjaimelta etäterminaalille tarkoitetun tiedonsiirron (BCRT-viesti) myötä kutsutaan funktiota *hi6110_rtmode_bcert()*, ja siirrettäessä tietoa toiseen suuntaan (RTBC-viesti) kutsutaan funktiota *hi6110_rtmode_rtbc()*. 1553TRC:n ohjelmistoon on toteutettu MIL-STD-1553:n mukaiset viestityypit etäterminaalilta toiselle tapahtuvaa tiedonsiirtoa (RTRT-viesti) lukuun ottamatta.

BCRT-viestin käsittelyssä haetaan ensin *hi6110_rtmode_bcert()*-funktion avulla viestiprosessorin FIFO-tyyppisestä muistista vastaanotettu tieto globaaliin *trc_datareg*-tietueeseen, jonka jälkeen päivitetään saman tietueen *addr*- ja *len*-muuttujien arvot. Mikäli moduuliliitynnän keskeytys on käytössä, asetetaan lisäksi keskeytyssignaali aktiiviseksi. Onnistuneen käsittelyn jälkeen kasvatetaan *ms1553_status*-tietueen muuttujan *rt_rxtransact* arvoa tai virheen tapahtuessa puolestaan muuttujan *rt_rxerror* arvoa. Lopuksi asetetaan moduuliliitynnän keskeytys pois päältä, mikäli se on ollut aktiivisena.

RTBC-viestien käsittelyssä ensimmäisenä päivitetään *trc_datareg*-tietueeseen liikennöintistatistiikat toiminnon ollessa konfiguroitu käyttöön. Liikennöintistatistiikat pitävät sisällään transaktiolaskurit, virhelaskurit ja väylävaihtojen lukumäärän. Tiedot kirjoitetaan ennalta konfiguroituun aliosoitteeseen, joka on luettavissa MIL-STD-1553-väylän kautta. Seuraavaksi kutsutaan *hi6110_rtmode_rtbc()*-funktiota, jossa halutun aliosoitteen tiedot kirjoitetaan FIFO-muistiin väylälle lähetettäväiksi. Siirron onnistuttua kasvatetaan *ms1553_status*-tietueen muuttujan *rt_txtransact* arvoa tai virhetilanteessa puolestaan muuttujan *rt_txerror* arvoa.

MIL-STD-1553:n moodikomentojen (Mode Code Command, MCC) tarkoituksena on välittää etäterminaalin ja väyläohjaimen välillä yksinkertaisia komentoja, joiden mukana voi kulkea yhden sanan verran tietoa [59, 4.3.3.5.1.7]. 1553TRC:n etäterminaalitilassa MCC-viestien käsittely tapahtuu joko funktiolla *hi6110_rtmode_mcc()*,

hi6110_rtmode_mccdt() tai *hi6110_rtmode_mccdr()* riippuen siitä, kulkeeko MCC-viestin mukana myös valinnainen datasana vai ei. Moodikomentojen käsittelyä ei voida tehdä keskeytysfunktiossa, sillä osa toiminnoista on kestoiltaan tai luonteeltaan siihen sopimattomia – esimerkkinä etäterminaalin alustaminen. MCC-viestin vastaanoton jälkeen asetetaan *ms1553_status*-tietueen muuttuja *rt_modecodeflag* nollasta poikkeavaan tilaan, koodi kirjoitetaan *rt_modecodecmd*-muuttujaan ja viestin sisältämän T/R-bitin tila kirjoitetaan muuttujaan *rt_modecodetr*. Mikäli MCC-viesti sisältää valinnaisen sanan, se kirjoitetaan *rt_modecodedr*-muuttujaan.

MCC-viestin mukainen toiminto suoritetaan pääohjelmassa *ms1553_status*-tietueen muuttujan *rt_modecodeflag* ollessa asetettuna. MIL-STD-1553B Notice 2 vaatii jokaiselta etäterminaalilta vähintään seuraavat toteutetut moodikomennot: "Transmit status word", "Transmitter shutdown", "Override transmitter shutdown" ja "Reset remote terminal" [60, 30.4.2]. Näistä MCC-viesteistä ensimmäinen suoritetaan kokonaisuudessaan viestiprosessorissa ja loput pääohjelmassa. Etäterminaalin alustusta (Reset remote terminal) ei ole standardissa määritelty yksityiskohtaisesti, joten 1553TRC:n tapauksessa kyseinen MCC-viesti aikaansaa ainoastaan viestiprosessorin alustuksen ja *ms1553_init()*-funktion kutsumisen [61, 50.5.2.3].

5.4 Hajautettu IO-yksikkö (ADIO1)

5.4.1 Valitut toteutustavat

ADIO1:ssä on antureille ja toimilaitteille neljää erilaista liitäntätyyppiä, joita tulisi voida lukea ja asettaa mahdollisimman suurella taaajuudella. Toteutuksen yksinkertaistamiseksi tässä työssä ei käytetty reaaliaikakäyttöjärjestelmää toimintojen ajoittamiseen, vaan käyttöjärjestelmän asemesta ADIO1:n eri tapahtumat suoritetaan tapahtumakäsittelijällä ennalta konfiguroitujen prioriteettien mukaisesti. Tiettyjen toteutuksellisten rajoitteiden vuoksi laitteen normaali toimintatila ja konfiguraatio-tila ovat erillisiä, joten ADIO1:n käytönaikainen statistiikka on saatavissa ainoastaan väylän kautta.

Laitteen ohjelmisto on kehitetty C-kielellä. Kääntäjäksi valittiin GNU-yhteisön GCC ja kehitysympäristöksi Rowley'n valmistama Crossworks. David A. Wheelerin SLOCCount-ohjelmalla laskettuna ADIO1:n ohjelmakoodia on 4031 rivin verran, ja käännettynä ohjelma vie mikrokontrollerin Flash-muistia 39,5 kB. ADIO1:n läh-

dekoodeja ei esitä liitteenä suuren rivimäärän vuoksi, vaan ainoastaan sähköisessä muodossa.

5.4.2 Tapahtumakäsittelijä

Vaikka ADIO1:ssä ei ole käyttöjärjestelmää, siinä on tarvetta suorittaa toistuvasti useita erilaisia toimintoja – osin samanaikaisesti. Reaaliaikaisimmat toiminnot tapahtuvat keskeytysten avulla ja vähemmän kriittiset toiminnot puolestaan erityisessä tapahtumakäsittelijässä, joka käynnistetään kutsumalla funktiota *event_handler()*. Tapahtumakäsittelijä on jatkuva silmukka, jossa suoritetaan yksittäisiä ja jaksoittaisia tapahtumia tiettyjen prioriteettien mukaisesti. Se on siis yksinkertainen skeduloija ilman moniajtoa.

ADIO1:ssä digitaalisten sisäänmenojen muutos ja 1553TRC:n rekisteriin kirjoitus ovat keskeyttäviä tapahtumia, jotka aiheuttavat lähes välittömät toimenpiteet. Sisäänmenojen muutoksista päivitetään rekisterien arvot 1553TRC:lle, ja MIL-STD-1553:n kautta tapahtuneen rekisterin kirjoituksen jälkeen digitaalisten ulostulojen mahdollisesti muuttuneet arvot luetaan 1553TRC:n rekistereistä. Nämä yksittäiset tapahtumat ovat korkeimmalla prioriteetilla tapahtumakäsittelijässä ohittaen jaksoittaiset tapahtumat.

Mikrokontrollerin ajastinlohko on konfiguroitu keskeyttämään 50 Hz:n taajuudella, jolloin globaalin *event_counter*-muuttujan arvoa kasvatetaan yhdellä. Tapahtumakäsittelijässä kaikki jaksoittaiset tapahtumat suoritetaan *event_counter*:n ohjaamina siten, että yhdessä aikalohkossa tapahtuu enintään yksi funktiokutsu. Tapahtumien suoritustaajuus- ja hetki konfiguroidaan esikäännösvaiheessa koodiin sijoitettavilla *EVENT_PTASKx_POS*- ja *EVENT_PTASKx_INT*-vakioilla, joita käytetään jakojäännösoperaation kanssa ehtolauseessa. Jakojäännösoperaation tuloksen vastatessa *EVENT_PTASKx_POS*-vakion arvoa suoritetaan kyseinen tapahtuma ellei sille ole esteitä. Kunkin tapahtuman varsinainen toiminnallisuus tapahtuu *trc_task()*-funktiossa, jossa väyläliityntämoduulin vastaanottamat tiedot siirretään ADIO1:n ulostuloihin ja puolestaan anturi-informaatio välitetään väyläliityntämoduulille. ADIO1:n ohjelma lukee ja kirjoittaa väyläliityntämoduulin aliosoitteita 0x02 – 0x05 taulukon 5.2 mukaisesti. 1553TRC päivittää aliosoitteessa 0x01 olevat liikennöintistatistiikat automaattisesti.

Taulukko 5.2: ADIO1:n alioisitteiden rekisterikuvaukset

Aliosoite	Pituus	Rekisterin kuvaus
0x01	17 sanaa	Liikennöintistatistiikat ja tunnistetiedot
0x02	1 sana	Digitaaliset sisäänmenot (1 bit / sisäänmeno)
0x03	1 sana	Digitaaliset ulostulot (1 bit / ulostulo)
0x04	8 sanaa	Analogiset sisäänmenot (32 bit / sisäänmeno)
0x05	8 sanaa	Analogiset ulostulot (32 bit / ulostulo)
0x1E	1 – 32 sanaa	Muistialue kirjoitus- ja lukutestille

Tapahtumakäsittelijässä konfiguraatietietueen *events*-muuttujan avulla käyttäjä voi valita, mitkä tapahtumat ovat aktiivisina. Yksittäinen tapahtuma estää seuraavan samanlaisen jaksollisen tapahtuman suorittamisen *skip_ptask*-muuttujan avulla. Tällä ominaisuudella estetään se, ettei yksittäistä tapahtumaa – esimerkiksi sisäänmenojen lukemista – toisteta välittömästi jaksollisessa tapahtumassa. Yksinkertaistettu ohjelmakoodi digitaalisten sisäänmenojen tapahtumalogiikasta on esitetty alla.

```

1  if (EVENT_PTASK1_POS == (event_counter % EVENT_PTASK1_INT) &&
2      last_tick != event_counter && (conf.events & 0x01))
3  {
4      //periodic task 1, DIN update
5      if (skip_ptask & 0x01)
6      {
7          skip_ptask &= ~(0x01);
8      }
9      else
10     {
11         trc_task(1);
12     }
13
14     //marking current tick used
15     last_tick = event_counter;
16 }
```

Tapahtumakäsittelijän tapahtumien suoritustaajuuteen käyttäjä ei voi vaikuttaa, sillä jakojäännösoperaatioon perustuva toiminta on vaikea hahmottaa ilman huolellista suunnittelua ja toiminnan testaamista. Tässä työssä käytetyillä asetuksilla analogisten sisäänmenojen ja ulostulojen päivitystaaajuus on 10 Hz, jota voidaan pitää moneen käyttöön riittävänä. Digitaalisten sisäänmenojen ja ulostulojen päivitys tapahtuvat aina ensisijaisesti keskeytysten perusteella, joten näille tapahtumille jaksollinen päivitys on vain virhetilanteita varten. Tapahtumakäsittelijän

EVENT_PTASKx_POS- ja *EVENT_PTASKx_INT*-vakioiden muuttaminen jälkikäteen on mahdollista, mutta se vaatii aina ADIO1:n ohjelmapäivityksen.

5.4.3 Komentorivikäyttöliittymä ja asetukset

ADIO1:n ohjelmistoon on toteutettu hallintaa varten Bourne shell -tyyppinen komentorivikäyttöliittymä, joka vastaa laitteen hallintasarjaportissa. Käyttöliittymä on toiminnallisesti ja ohjelmakoodiltaan täysin vastaava kuin TRC-ADA:ssakin, joten tässä kappaleessa käsitellään ainoastaan ADIO1:n käyttöliittymää koskevat asiat. Komentorivikäyttöliittymän toiminta on selostettu muutoin kappaleessa 5.5.2.

Komennolla **status** laite listaa sekunnin välein ruudulle erilaisia tilatietoja, kuten ympäristön lämpötilan ja sisäänmenojen jännitteet. ADIO1:n jänniteulostulojen kalibroimista helpottamaan on toteutettu **cal**-komento, jonka suorittaminen muuttaa laitteen kalibroitikertoimet asetusarvojen mukaisesti. TRC-ADA:n tapaan komentojen ohjeistukset ja parametrien kuvaukset selviävät komennon **help** avulla.

Set- ja **show**-komennolla laitteen asetuksia voidaan muuttaa ja tarkastella. Lukuisien sisäänmenojen ja ulostulojen vuoksi erilaisia asetusarvoja on lähemmäs puolen sataa, sillä jokaisella analogisella liitännällä on omat kalibrointiarvonsa sekä jokaisella ulostulolla on oletustilansa. Edellä mainittujen asetusten lisäksi **set**-komennolla voidaan muuttaa muun muassa sarjaportin asetuksia ja tapahtumakäsittelijän aktiivisia tapahtumia. ADIO1:ssä on ulkoinen EEPROM-muisti, jonka sisältö kopioidaan mikrokontrollerin SRAM-muistiin käynnistysvaiheessa. **Set**- ja **show**-komennolla käsitellään ainoastaan SRAM-muistin sisältöä eikä EEPROM:ssa olevia haihtumattomia asetuksia. **Set**-komennolla muutettujen asetusten kirjoittaminen EEPROM:iin tapahtuu komennolla **write**.

Ulkoisen EEPROM:n sisältö luetaan *conf*-tietueeseen *conf_read_memory()*-funktioilla ja vastavuoroisesti EEPROM:n kirjoittaminen konfiguraatietietueen sisällöllä tapahtuu funktiolla *conf_write_memory()*. ADIO1:n käynnistysvaiheessa funktiossa *conf_init()* EEPROM:n viimeisen muistisolun sisältöä verrataan *CONFIG_MAGICBYTE*-vakion arvoon, ja mikäli ehtolause on tosi, luetaan konfiguraatiomuistin sisältö *conf*-tietueeseen. Alustamattoman muistin tapauksessa ehtolause on epätosi, jolloin EEPROM alustetaan oletusasetuksilla kutsumalla funktiota *conf_factory_default()*.

5.4.4 Laitteistorajapinnat

Analogisten ulostulojen DA-muunnin (AD5666) kommunikoi mikrokontrollerin kanssa yksisuuntaisesti SPI-väylän avulla [5]. Muuntimen sisäisiä rekistereitä kirjoitetaan *ad5666_writereg()*-funktiolla, joka ottaa parametreikseen komennon, osoitteen ja datan. Varsinainen tiedon lähettäminen muuntimelle tapahtuu *spi0_putword()*-funktiolla. Ennen DA-muuntimen käyttämistä se tulee alustaa kutsumalla funktiota *ad5666_init()*, joka lähettää SPI-väylälle piirin alustuskomennon. Millivoltteina oleva ulostulojännite kirjoitetaan DA-muuntimen ulostuloihin *aout_set()*-funktiolla, jonka parametreina ovat kanava ja jännite. Funktiossa päivitetään uusi ulostulon arvo globaaliin *aout_state*-funktioon sekä kerrotaan ulostulon arvo *aout_cal*-muuttujataulukon kalibrointikertoimilla. Funktiossa *aout_init()* kalibrointikertoimet lasketaan ennalta *conf*-tietueen asetusten perusteella, jotta ulostulojen arvoja muutettaessa olisi mahdollisimman vähän suoritettavia laskutoimituksia.

Analogiset sisäänmenot mitataan AD7794-piirillä, joka on SPI-liitäntäinen AD-muunnin [3]. Ennen piirin käyttämistä se tulee alustaa *ad7794_init()*-funktiolla, joka tarkistaa piirin toiminnan ja asettaa sen oikeaan toimintatilaan. Piirissä on useita rekistereitä, joiden kautta voidaan lukea kanavien muunnostulokset sekä konfiguroida muunninta. Rekistereitä luetaan *ad7794_readreg()*-funktiolla ja kirjoitetaan puolestaan *ad7794_writereg()*-funktiolla. Näiden komentojen matalan tason SPI-toiminnallisuus tapahtuu *spi0_putchar()*- ja *spi0_getchar()*-funktioissa. Kutsumalla *Ain_read()*-funktiota muunnin tekee varsinaiset mittaukset, jotka muutetaan mikrovolteiksi *ain_cal*-muuttujataulukon kalibrointikertoimilla. DA-muuntimen tapaan myös AD-muuntimen kalibrointikertoimet lasketaan ennalta *ain_init()*-funktiota kutsumalla. AD-muunnin on $\Delta\Sigma$ -tyyppinen, joten sen näytteistystaajuus ei ole erityisen suuri [39]. Muunnokset tehdään 470 Hz:n taajuudella jatkuvassa muunnostilassa.

Digitaaliset sisäänmenot ja ulostulot ovat yksinkertaisia ohjelman toteutuksen kannalta. Kappaleessa 4.3.3 esitelty ulostulojen turvakytkentä täytyy alustaa *dout_init()*-funktiolla ennen kuin ulostulot ovat ohjattavissa. Funktio asettaa ulostulot oletustiloihin sekä asettaa *DOUT_EN1*- ja *DOUT_EN2*-signaalit toisistaan poikkeaviksi kytkennän aktivoimiseksi. Ulostulot asetetaan *dout_set()*-funktiolla, joka ottaa parametreikseen ulostulojen arvot. Digitaaliset sisäänmenot luetaan keskeytysfunktiossa, jossa sisäänmenojen tilat kirjoitetaan globaaliin *din_state*-

muuttujaan. Keskeytys konfiguroidaan käyttöön kutsumalla funktiota *din_init()*, joka alustaa lisäksi sisäänmenojen tilamuuttujan. ADIO1:n suunnitteluvaiheessa *DIN_IRQ*-linjaa oli tarkoitus käyttää mikrokontrollerin ulkoisen keskeytyksen kanssa. Ohjelmistokehitysvaiheessa kuitenkin havaittiin, ettei tällöin valitulla mikrokontrollerilla ollut mahdollista saada aikaan keskeytystä sekä signaalin nousevalla että laskevalla reunalla. Onneksi mikrokontrollerin IO-ohjainlohkon keskeytystoiminnoilla oli kuitenkin mahdollista keskeyttää signaalin molemmilla reunoilla, joten ongelma voitiin kiertää.

ADIO1:n syöttöjännitteet ja lämpötila luetaan matalan resoluution AD-muuntimella, joka liittyy muiden muuntimien tavoin samalle SPI-väylälle [35]. Funktio *read_genadc()* palauttaa muunnostuloksen bitteinä funktioparametrina annettavan sisäänmenokanavan mukaisesti. Matalan tason SPI-kommunikointi tapahtuu *spi0_rword()*-funktioilla, joka samaan aikaan sekä lähettää että vastaanottaa dataa. Sisäänmenon kanavavalinta kirjoitetaan muunnoksen luennan yhteydessä, joten kanavaa vaihdettaessa muunnos täytyy tehdä kaksi kertaa.

MIL-STD-1553:n etäterminaalin osoite ja sen pariteettibitti luetaan kuusikanavaiselta DIP-kytkimeltä. ADIO1:n alustusfunktiossa sisäänmenot on konfiguroitu ylösvedollisiksi, sillä osoitelinjoilla ei ole ulkoisia ylösvetovastuksia. Funktio *hwaddr_read()* lukee osoitteen ja tarkistaa sen pariteetin. Pariteettivirheen tapauksessa funktio palauttaa osoitteeksi 255. Konfiguraatiotilassa (osoite 31) pariteettitarkistusta ei tehdä.

5.5 Väyläohjain (TRC-ADA)

5.5.1 Valitut toteutustavat

TRC-ADA on laitteistoltaan hyvin yksinkertainen laite, joka tarjoaa väyläliityntämoduulille tehonsyötön sekä RS-232-liitännän mikrokontrollerin kautta. Laitteiston yksinkertaisuudesta huolimatta TRC-ADA:n ohjelmistoa muuttamalla laite voi toimia monessa eri roolissa. Tässä työssä TRC-ADA:n ohjelmisto toimii ainoastaan yksinkertaisena väyläohjaimena, eikä muita laitteen lukuisista mahdollisuuksista ole toteutettu. Pelkästään ohjelmistomuutoksilla TRC-ADA voisi toimia väyläohjaimen lisäksi väylämonitorina tai esimerkiksi Modbus/MIL-STD-1553-yhdyslaitteena.

Työssä toteutettua väyläohjainta ei ole ajateltu sellaisenaan teollisuuteen soveltuvaksi, vaan kyseessä on lähinnä tutkimuskäyttöön tarkoitettu laite. Väyläohjaimen ohjelmisto on ominaisuuksiltaan hyvin monipuolinen, mutta laitteen konfiguroiminen vaatii MIL-STD-1553:n ja kehitetyn kyselylistakielen perusteellista tuntemusta. TRC-ADA:n komentorivikäyttöliittymä on kuitenkin toteutettu siten, että käytettävyydeltään helpomman tietokoneohjelman tekeminen laitteelle olisi tarvittaessa mahdollista.

TRC-ADA:n ohjelmisto on kirjoitettu C-kielillä. Kääntäjänä on käytetty HP InfoTechin CodeVisionAVR-ohjelmaa, jossa on myös graafinen kehitysympäristö integroituna. Ohjelmiston vianhaussa ja ohjelman lataamisessa on käytetty Atmelin AVRStudio-kehitysympäristöä. David A. Wheelerin SLOCCount-ohjelmalla lasketuna TRC-ADA:n ohjelmakoodia on 3696 rivin verran, ja käännettynä ohjelma vie mikrokontrollerin Flash-muistia 28,2 kB. Suuren rivimäärän vuoksi TRC-ADA:n lähdekoodeja ei esitetä liitteenä, vaan ainoastaan sähköisessä muodossa.

5.5.2 Komentorivikäyttöliittymä

TRC-ADA:aa hallitaan Bourne shell -tyyppisellä komentorivikäyttöliittymällä. Bourne shell on alun perin vuonna 1977 julkaistu komentoriviohjelma, joka löytyy edelleenkin lähes kaikista UNIX-pohjaisista käyttöjärjestelmistä [21]. TRC-ADA:n komentorivikäyttöliittymä ei hyödynnä Bourne shellin lähdekoodeja eikä se ole kuin olennaisin osin yhteensopiva. Bourne shell valittiin käyttöliittymän pohjaksi, koska UNIX-tyyppisiin järjestelmiin perehtyneiden on tällöin helppoa omaksua myös TRC-ADA:n käyttäminen. Oikeaan UNIX-järjestelmään verrattuna TRC-ADA:n selkein ero on tiedostojärjestelmän puuttuminen, jolloin tiedostoina esitettävät komennot ovatkin kiinteitä C-kielisiä funktioita. AVR-mikrokontrollerin uudelleenkirjoitettavan EEPROM-muistia käsitellään ainoastaan komentojen kautta, eikä komentorivikäyttöliittymässä ole muita keinoja muistin kirjoittamiseen.

Väyläohjaimen liittyvien spesifisten komentojen lisäksi TRC-ADA:ssa on muutamia UNIX-järjestelmistä tuttuja yleisiä komentoja. Komennolla `ls` listataan laitteen kaikki komennot eli pseudotiedostot. Komentojen `uname` ja `uptime` avulla käyttäjä saa tietoonsa muun muassa laitteen ohjelmaversion ja päälläoloajan. Edellä mainitut komennot sisältyvät `cli_start()`-funktioon, jossa on toteutettu koko käyttöliittymälogiikka ja muiden komentojen funktiokutsut. `Reboot`-komennon avulla lai-

te käynnistetään uudestaan kutsumalla funktiota *cli_reboot()*, jossa hyödynnetään mikrokontrollerin sisäistä vahtikoira-ajastinta. Kuvassa 5.4 on esitetty esimerkkinäkymä TRC-ADA:n käyttöliittymästä, jossa \$-merkillä alkavat rivit ovat käyttäjän syöttämiä komentoja.

```

-r-xr-xr-x      1 NA      NA      NA      Jan  1  1970 ls
-r-xr-xr-x      1 NA      NA      NA      Jan  1  1970 reboot
-r-xr-xr-x      1 NA      NA      NA      Jan  1  1970 set
-r-xr-xr-x      1 NA      NA      NA      Jan  1  1970 show
-r-xr-xr-x      1 NA      NA      NA      Jan  1  1970 trc
-r-xr-xr-x      1 NA      NA      NA      Jan  1  1970 uname
-r-xr-xr-x      1 NA      NA      NA      Jan  1  1970 uptime

$ 1553stat --bc
Getting BC status from TRC... OK!

RX transactions: 2414144022
TX transactions: 2414144022
Missed transactions: 0
RX errors: 0
TX errors: 0
Bus changes: 0
Active bus: A
Last error: 0x0000

$ uptime
up 9 day(s), 08:08:14

$

```

Kuva 5.4: TRC-ADA:n komentorivikäyttöliittymä

5.5.3 Kyselylistakomennot

1553TRC:n toimiessa väyläohjaintilassa se suorittaa komennot kyselylistaa läpikäymällä, kuten kappaleessa 5.3.3 on esitelty. Koska 1553TRC:ssä ei ole haihtumatonta muistia kyselylistalle, täytyy se ladata moduuliin alustuksen jälkeen. Kyselylistoja hallitaan neljällä komennolla, joita voi käyttää ainoastaan 1553TRC:n ollessa laitteen moduulipaikassa.

Komennolla **1553rq1** luetaan TRCCOMM-protokollan avulla 1553TRC:ltä koko kyselylistan sisältö. Käytännössä komento kutsuu *trc_read_querylist()*-funktia silmukassa, kunnes 1553TRC palauttaa listan päätöskomennon (EOL). Kyselylistan komennot tulkitaan tekstimuotoon ja esitetään taulukkona.

Yksittäisten kyselylistan rivien kirjoittaminen 1553TRC:lle tapahtuu 1553wql-komennolla, joka tarvitsee komennosta riippuen muutamia lisäparametreja. Lisättävä komento ja sen parametrit erotellaan toisistaan kaksoispisteillä; parametri/arvoparit erotellaan puolipistein. Jokaisen parametrin arvoalue tarkistetaan ennen 1553TRC:lle kirjoittamista. Mikäli komento kirjoitetaan kyselylistaan, on parametri *pos* pakollinen ilmaisemaan komennon sijaintia listassa. Kerran suoritettavaa komentoa varten parametriksi lisätään *pos*:n tilalle *inject*. Syötteiden perusteella muodostetaan paikallisen *bclist*-tietueen sisältö, joka annetaan *trc_write_querylist()*-funktiolle parametrina. Lista komennoista on esitetty taulukossa 5.1, ja jokaisen kyselylistakomennon tarkka syntaksi selviää TRC-ADA:n käskyllä *help 1553cmd*.

1553TRC:n kyselylista tallennetaan TRC-ADA:n haihtumattomaan muistiin komennolla 1553save. Komento kutsuu *trc_eeprom_save_querylist()*-funktia, joka puolestaan *trc_read_querylist()*-funktion avulla lukee yksitellen kyselylistan rivit ja kirjoittaa ne mikrokontrollerin sisäiseen EEPROM-muistiin. Lukeminen tapahtuu silmukassa, kunnes EOL-komento vastaanotetaan tai kyselylistan maksimikoko saavutetaan.

1553load-komento toimii 1553save:n tavoin, mutta päinvastoin. Komento kutsuu funktiota *trc_eeprom_load_querylist()*, joka lukee TRC-ADA:n EEPROM-muistista sinne tallennetun kyselylistan ja kirjoittaa sen 1553TRC:lle *trc_write_querylist()*-funktion avulla. *trc_eeprom_load_querylist()*-funktia kutsutaan myös TRC-ADA:n käynnistyrakenteen yhteydessä, mikäli *runonboot*-konfiguraatioparametri on aktiivisena. Tällöin väyläohjain käynnistyy automaattisesti muistiin tallennetulla kyselylistalla TRC-ADA:n käyttöjännitteen kytkemisen jälkeen.

5.5.4 Väylänhallintakomennot

TRC-ADA:an on toteutettu muutamia MIL-STD-1553-väylän ylläpitoon ja vianhakuun liittyviä komentoja. Tavanomaisissa MIL-STD-1553-pohjaisissa järjestelmissä, kuten lentokoneissa, väylärakenteet ovat tarkkaan ennalta suunniteltuja eikä järjestelmiä useinkaan laajenneta. Teollisuusympäristössä muutoksia käyttö- ja turva-automaatioon tapahtuu huomattavasti useammin ja ne pyritään tekemään mahdollisimman lyhyin huoltokatkoin. Kentällä tapahtuvan asennus- ja vianhakutyön helpot-

tamiseksi TRC-ADA:n `1553scan`-komennolla voidaan etsiä väylältä kaikki käytössä olevat etäterminaalit. Komento käy läpi jokaisen laiteosoitteen ja lukee aktiivisen etäterminaalin liikennöintistatistiikat. Löydetyt etäterminaalit esitetään listamuodossa, josta selviää laitetyyppi ja laitteen nimi. Koska MIL-STD-1553-standardi ei määrittele mitään tapaa väylälaitteen tunnistamiseksi, tässä työssä toteutettu tunnistusmenetelmä ei ole yhteensopiva minkään muun järjestelmän kanssa. Tunnistustiedot on kirjoitettu `1553TRC`:n ennalta konfiguroituun aliosoitteeseen liikennöintistatistiikkojen kanssa.

Komennolla `1553stat` voidaan listata väyläohjaimen tai yksittäisen etäterminaalin liikennöintistatistiikat. Käyttämällä vipua `--bc` komento listaa väyläohjaimen tiedot, ja puolestaan `--rt=osoite`-vivulla tulostetaan halutun etäterminaalin liikennöintistatistiikat. Väyläohjaimen tiedot luetaan `trc_read_bcstat()`-funktion avulla, mutta etäterminaalin tietojen lukeminen tapahtuu monivaiheisesti `1553TRC`:lle injektoiduilla komennoilla. Esimerkki väyläohjaimen statistiikoista on esitetty kuvassa 5.4.

MIL-STD-1553-standardin mukaisesti etäterminaalilla voi olla enintään 32 sanaa pitkiä aliosoitteita, eli rekistereitä, 30 kappaletta [59, 4.5.5.5.1.5]. `1553TRC`:ssä näitä rekistereitä käytetään myös väyläohjaintilassa, mutta tällöin ne toimivat usein puskureina tai tilapäisinä apumuuttujina. Rekisterien sisältö voidaan listata heksadesimaalimuodossa komennolla `1553reg`.

5.5.5 Muut komennot

Laitteen käyttäminen komentorivikäyttöliittymällä voi olla hankalaa ilman käyttöohjetta tai muuta ohjeistusta. Erityisesti `1553wql`-komennon syntaksi on monimutkainen ja se riippuu kulloinkin kirjoitettavasta väylälistakomennosta. Tämän vuoksi käyttöliittymään toteutettiin `help`-komento, joka kertoo lyhyesti jokaisen komennon käyttötarkoituksen ja syntaksin.

TRC-moduuliliityntää hallitaan komennolla `trc`, jolla voidaan muun muassa kontrolloida liittynnän tehonsyöttöä (`trc [on | off | reset]`) ja alustaa väyläliityntämoduuli (`trc init`). Osaa komennoista voidaan käyttää ainoastaan `1553TRC`:n ollessa moduuliliitynnässä, jolloin voidaan kontrolloida väyläohjaimen tilaa (`trc [bcon | bcoff]`) sekä aktiivista väylää (`trc [busa | busb]`). Normaalisti `trc-`

komennon alustukset suoritetaan automaattisesti TRC-ADA:n käynnistyessä, joten komentoa tarvitaan lähinnä vianhakutilanteissa.

TRC-ADA:n ohjelmisto sisältää runsaasti tilatietoja ja muutettavia asetusarvoja sarjaliikenneasetuksista TRC-liitännän ominaisuuksiin. Komennolla **show** voidaan tulostaa parametrin arvo, ja asetusarvojen muutos tapahtuu puolestaan **set**-komennolla. Mikäli laitteen asetukset halutaan alustaa oletuksiinsa, se tapahtuu komennolla **initconf**. TRC-ADA:n asetusarvot sekä esimerkki asetus- ja lukukomentojen käytöstä on esitetty kuvassa 5.5.

```
$ help parameters

      Parameter:      Description:
      =====      =====

rs232_baudrate      rs232 baudrate (1200 - 115200, RW)
rs232_databits      rs232 databits (7 - 8, RW)
rs232_parity        rs232 parity (N - E, RW)
trc_commode         TRC communication mode (0 - 2, RW)
trc_opmode          TRC operating mode (0 - 2, RW)
trc_swaddr          TRC software address (0 - 30, RW)
trc_type            TRC type (0 - 1, RW)
trc_version         TRC version (R)
runonboot           Run and initialize TRC after powering up (0 - 1, RW)
version            TRC-ADA software version

$ set rs232_baudrate=115200
set: rs232_baudrate=115200
$ show rs232_baudrate
show: rs232_baudrate=115200
$ show version
show: version=0.93
$
```

Kuva 5.5: TRC-ADA:n asetusarvot

6. TESTAUS JA TULOKSET

6.1 Toiminnallinen testaus

Toiminnallisen testauksen tarkoituksena on varmistaa, että kehitetyt laitteet toimivat suunnitellusti ja että ne täyttävät niille asetetut vaatimukset. Laitteen tulee toimia oikein paitsi itsenäisesti, myös muiden laitteiden kanssa. Koelaitteistoa testattiin työn kannalta riittävässä laajuudessa sekä keskeisimpien sähköisten ominaisuuksien että väylätoimintojen osalta.

6.1.1 Sähköinen testaus

Välittömästi piirilevyjen kalustamisen jälkeen jokainen laite testattiin tärkeimmiltä sähköisiltä ominaisuuksiltaan, joita olivat muun muassa tehölähdekytkentöjen ulostulojännitteet ja oskillaattorien kellotaajuudet. Näillä alustavilla testeillä varmistuttiin siitä, että ohjelmistokehitystä voitiin jatkaa laitteiston puolesta.

Laitteiden ohjelmistojen kehittyessä testattiin tarpeen mukaan yksittäisiä laitteiston osioita, kuten sisäänmeno- ja ulostulokytkentöjä. ADIO1:n analogisten liitäntöjen tarkkuutta vaatineet kalibroinnit tehtiin Agilentin 34401A-tarkkuusyleismittarin ja 6613C-virtalähteen avulla. Digitaalisten sisäänmenojen ja ulostulojen suojauksia testattiin jatkuvilla ja pulssimaisilla ylijännitteillä, jotka generoitiin edellä mainitulla virtalähteellä ja yksinkertaisella tietokoneohjelmalla. GNU/Linux -käyttöjärjestelmään kirjoitettu C-kielinen testausohjelma kommunikoi virtalähteen kanssa sarjaliikenteellä ja generoi ADIO1:n testattaviin liitäntöihin muutamien kymmenien voltin ylijännitteitä. ADIO1:n liitäntöjen suojaukset toimivat testien aikana ja niiden jälkeen moitteetta.

Ohjelmistokehityksen valmistuttua toistettiin muutamia sähköisiä testejä ja mitattiin tehonkulutuksia erilaisissa toimintatiloissa. Sekä TRC-ADA että ADIO1 on

suunniteltu toimimaan teollisuudessa yleisellä 24 voltin tasajännitteellä, mutta käytännössä laitteiden jännitealue on paljon laajempi. TRC-ADA:n sallittu käyttöjännitealue on 8 – 35 V ja ADIO1:n puolestaan 18 – 35 V.

TRC-ADA läpäisi tehonsyötön ali- ja ylijännitetestit ongelmitta, mutta ADIO1:n osalta havaittiin muutama ongelma. Ensinnäkin ADIO1:n laitteistoon ei oltu toteutettu jännitevalvontakytkentää, joka estäisi mikrokontrollerin toiminnan yhdenkin kytkennän sisäisen käyttöjännitelinjan ollessa rajojen ulkopuolella. Laitteen prosessoriosuus toimii vielä noin 7 voltin sisäänmenojännitteellä, mutta analogisissa ja digitaalisissa liitännöissä tarvittavaa 14 voltin jännitettä ei tällöin alijännitteen vuoksi saada reguloitua. ADIO1:n sisäänmenojännitteet voitaisiin mitata ohjelmallisesti (kappaleet 4.3.2 ja 5.4.4), mutta laitteen ohjelmistoon tätä ominaisuutta ei oltu toteutettu.

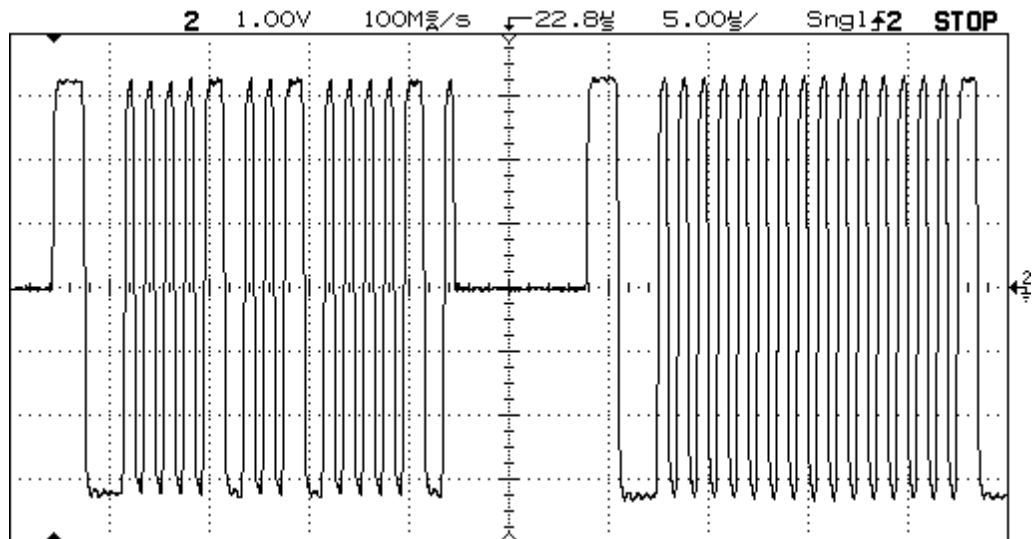
Käyttöjännitteiden mittauksiin liittyy lisäksi eräs laitteisto-ongelma: diodien D3 ja D4 estosuuntaiset vuotovirrat ovat merkittävän suuret, joka häiritsee sisäänmenojännitteiden mittausta. Käytännössä tämä ilmenee virheellisesti mitattuna jännitteinä kytkemättömässä teholähdeliitännässä. Mikäli liitännässä on kuormana muita laitteita tai siihen on kytketty käyttöjännite, ongelmaa ei esiinny. Laitteen toiminnan kannalta ongelma ei ole kovin merkityksellinen, mutta se tulisi korjata ennen ohjelmallisen käyttöjännitteiden valvonnan toteuttamista. Edellä mainittua yksityiskohtaa lukuun ottamatta työssä toteutetut laitteet toimivat suunnitellusti.

6.1.2 Väylätoimintojen testaus

Laitteiden väylätoteutukset testattiin pintapuolisesti, sillä MIL-STD-1553:n yksityiskohtainen testaus rajattiin tämän työn ulkopuolelle ja lisäksi HI-6110-viestiprosessorin kontrolloimat toiminnot ovat jo piirivalmistajan validoimia. 1553TRC:n väylätoteutuksen osalta testattiin sähköiset ominaisuudet, redundanttisuuden toimivuus sekä tiedonsiirron luotettavuus.

1553TRC:n väylälähtetimen aaltomuodot mitattiin digitaalisella oskilloskoopilla (Hewlett-Packard 54615B) käyttäen TRB/BNC-välijohtoja. Mittauksissa todettiin jännitetasojen olevan standardin mukaiset eli välillä 18 – 27 Vpp [59, 4.5.2.1.1.1]. Myös väyläsignaalin aaltomuoto ja taajuusvakaus todettiin hyviksi. Kuvassa 6.1 on esitetty väylältä mitattu RTBC-kommunikaatio, jonka ensimmäinen sana on väyläohjaimen tekemä pyyntö (komentosana) ja toinen sana on etäterminaalin vastaus-

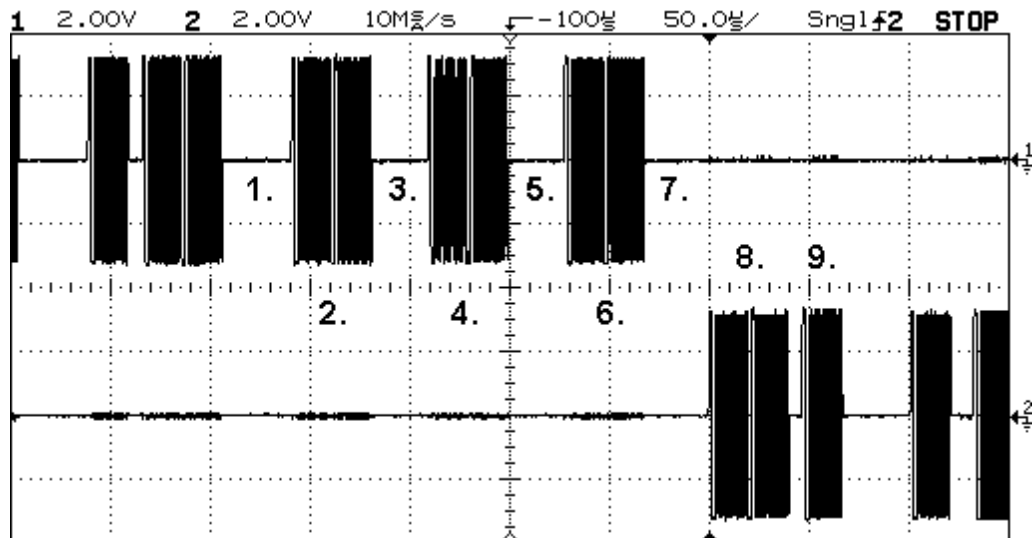
viestin ensimmäinen sana (tilasana). Testijärjestelyssä väylän huipusta–huippuun -jännite (Vpp) oli noin 6,5 voltia isolaatiovastuksien ja terminaatteorien kuormituksen vuoksi. 1553TRC:n toimiessa etäterminaalina sen väyläviestin vastausviivettä tutkittiin Interface Technologiesin 553A-mallisella MIL-STD-1553-analysaattorilla, jolloin vastausajan keskiarvoksi saatiin noin 7 μ s enimmäispoikkeaman ollessa alle 1 μ s. Vastausajan sallittu vaihteluväli on 4 – 12 μ s [59, 4.3.3.8].



Kuva 6.1: Oskilloskooppikuva RTBC-viestistä MIL-STD-1553-väylällä

Kuten jo kappaleessa 5.3.3 on todettu, MIL-STD-1553 ei määrittele redundanttisuuden yksityiskohtaista toteutusta. Tämän työn koelaitteistossa väyläohjain on virheen tapahtuessa konfiguroitu yrittämään kaksi kertaa uudelleen, jonka jälkeen aktiivinen kanava vaihdetaan ja yritetään vielä enintään kolme kertaa ennen komennon ohittamista. Redundanttisuus testattiin kuvan 6.3 kaltaisella testijärjestelyllä, jossa toiselle etäterminaalille lähetettiin toistuvasti BCRT-viestejä. Aktiivinen kanava irrotettiin ja väylän automaattista vaihtumista tarkasteltiin oskilloskoopilla.

Kuvassa 6.2 on esitetty oskilloskooppinäköymä väylävaihdosta. Kohdassa 1 etäterminaalin A-kanava irrotetaan, ja väyläohjaimen kohdassa 2 lähettämään BCRT-viestiin ei ole saada ajoissa etäterminaalin vastausta (kohta 3). Väyläohjain yrittää lähettää viestin A-kanavalle kaksi kertaa uudelleen (kohdat 4 ja 6), mutta etäterminaalilla ei vastaa niihin (kohdat 5 ja 7). B-kanava vaihdetaan aktiiviseksi, ja BCRT-viesti lähetetään uudelleen kohdassa 8. Etäterminaalilla vastaa viestiin tilasanalla kohdassa 9, jonka jälkeen väyläliikenne jatkuu normaalisti B-kanavalla.



Kuva 6.2: Väylävaihdos testijärjestelmässä

Väyläliikenteen luotettavuutta tutkittiin kuvan 6.3 testijärjestelyllä, jossa väyläohjain siirsi yhtä datasanaa IO-yksiköltä toiselle. Väyläkomentojen välissä oli 10 μ s:n viiveet. 1553TRC:n transaktiolaskurit ovat 32-bittisiä muuttujia, joten 2^{32} :n (noin 4,2 miljardin) operaation jälkeen ne pyörähtävät ympäri. Laitteistoa testattiin yhtäjaksoisesti noin kaksi viikkoa, joiden aikana transaktiolaskurit pyörähtivät ympäri kaksi kertaa ilman virheitä. Ajan puutteen vuoksi testausta ei jatkettu pidemmälle, eikä täten väyläkommunikaation virhetodennäköisyyksiä voitu laskea. Pariteettivirheitä voisi ilmaantua, jos väylälle kytkettyjen laitteiden määrää lisättäisiin ja sen pituutta kasvatettaisiin. Kattavampaan testiin ei kuitenkaan ollut mahdollisuuksia tämän työn puitteissa.

6.2 Suorituskykymittaukset

Teollisuudessa käytettävän turvaväylän tärkeimpiä ominaisuuksia ovat luotettavuus, ylläpidettävyys ja monissa sovelluksissa myös nopeus. Tässä työssä keskityttiin mitausten osalta erityisesti järjestelmän välityskykyyn ja vasteaikoihin, sillä MIL-STD-1553:n luotettavuutta on jo tutkittu useita vuosikymmeniä [1, 2-1].

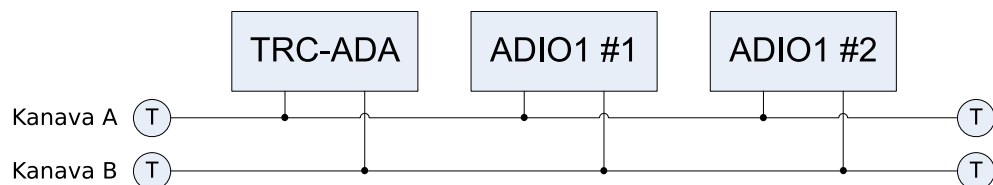
6.2.1 Testijärjestelmän kuvaus

Toteutetuista laitteista rakennettiin testijärjestelmä, joka koostui kahdesta etäterminaalista (ADIO1) ja yhdestä väyläohjaimesta (TRC-ADA). Testattavan järjestelmän

rakenne on esitetty kuvassa 6.3, ja kuvassa 6.4 on puolestaan valokuva testijärjestelystä. Väyläohjaimen laadittiin kyselylistaohjelma, joka luki ADIO1 #1:n digitaalisten sisäänmenojen arvot väyläohjaimen muistiin ja siirsi ne edelleen ADIO1 #2:n digitaalisiin ulostuloihin. BCRT- ja RTBC-komentojen välissä oli viivekomennot, joiden arvot olivat testeissä 10, 30, 100 tai 1000 μ s. Testi simuloi yksinkertaista turvajärjestelmää, jossa esimerkiksi rajakytkimen aktivoituminen estää toimilaitteen toiminnan. Useampien väylällä olevien laitteiden vaikutus saatiin huomioitua viiveillä, sillä MIL-STD-1553:n tapauksessa jokainen operaatio on ajallisesti tarkkaan ennustettavissa. Testeissä käytetty kyselylistaohjelma on esitetty alla.

	POS:	SRC:	DEST/INDEX:	SRC SA/REG:	DEST SA/REG:	CMD:	DATA:
1							
2							
3	0	0	-	2	10	RTBC	-
4	1	-	-	-	-	DLY	10
5	2	-	1	10	3	BCRT	-
6	3	-	-	-	-	DLY	10
7	4	-	-	-	-	JMP	0
8	5	-	-	-	-	EOL	-

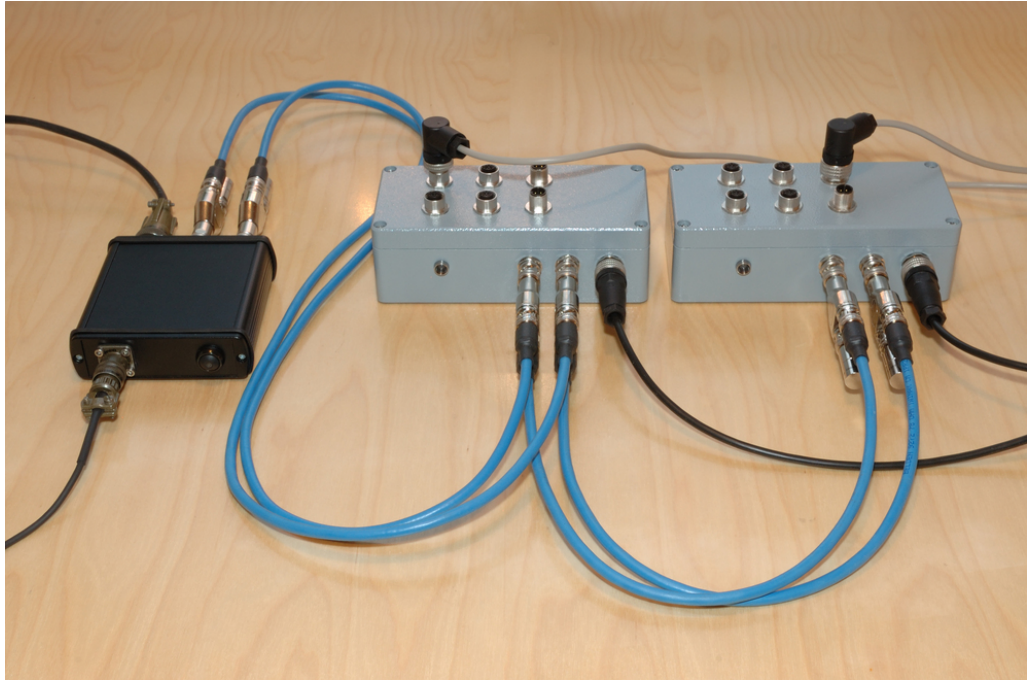
Järjestelmän kaistanleveys on analogisten liitäntöjen osalta merkittävästi pienempi. ADIO1:n AD-muuntimen näytteistystaajuus on vain 470 Hz, ja lisäksi kuuden kanavan peräkkäinen näytteistäminen laskee kanavakohtaisen näytteistystaajuuden noin kuudesosaan tästä. Ulostulojen DA-muunnokset tapahtuvat huomattavasti nopeammin kuin AD-muunnokset, mutta analogiset ulostulot ovat silti digitaalisia hitaampia. Tyypillisesti teollisuusprosesseissa analogisilta signaaleilta ei odoteta kovin suurta kaistanleveyttä, joten testeissä keskityttiin tutkimaan ainoastaan ADIO1:n digitaalisia liitäntöjä.



Kuva 6.3: Suorituskykymittauksissa käytetyn järjestelmän rakenne

IO-yksikön (ADIO1 #1) yhteen PNP-tyyppisistä sisäänmenoista kytkettiin Hewlett-Packardin 33120A-funktiogeneraattori yksinkertaisen adapterikytkennän avulla. Funktiogeneraattorin logiikkatasoisella ulostulolla ohjattiin N-kanavaista MOSFET-transistoria, jonka nielu oli kytketty 1 k Ω :n vastuksen kautta 18 voltin jännitteeseen. ADIO1:n sisäänmeno kytkettiin transistorin nielun ja maan (lähteen)

välille. Edellä kuvatun adapterikytkennän avulla voitiin funktiogeneraattorilla tuottaa IEC 61131-2:n mukaisia jännitetasoja. Signaalin tarkkailemiseksi funktiogeneraattorin ulostulo haaroitettiin myös digitaalisen oskilloskoopin (Hewlett-Packard 54615B) ensimmäiseen kanavaan.



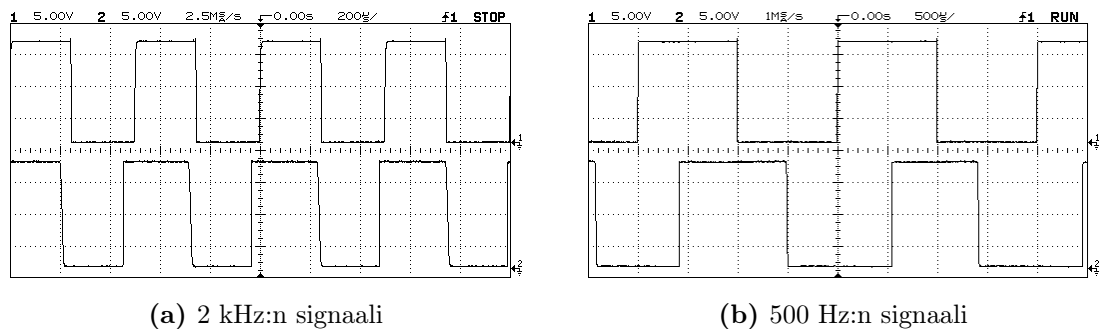
Kuva 6.4: Suorituskykymittausten testijärjestely

Toisen IO-yksikön (ADIO1 #2) yhteen PNP-tyyppiseen ulostuloon kytkettiin kuormaksi $1\text{ k}\Omega$:n vastus, jonka yli olevaa jännitettä mitattiin oskilloskoopin toiseen kanavaan kytketyllä mittapäällä. Kummankin ADIO1:n 18 voltin käyttöjännite tuotettiin Hewlett-Packardin 66332A-virtalähteellä. Testijärjestelyn kahdennettu väyläkaapelointi tehtiin kappaleessa 4.5.2 esitellyillä kaapeleilla, liittimillä, haaroittimilla ja terminaattoreilla.

Taulukossa 5.2 määritelty digitaalisten sisäänmenojen rekisteri 0x02 on yhden datasanan pituinen, kuten myös digitaalisten ulostulojen rekisteri 0x03. Sisäänmenojen lukemiseen tarvittavan RTBC-operaation enimmäiskesto saadaan seuraavasti: $20\text{ }\mu\text{s}$ (komentosana) + $12\text{ }\mu\text{s}$ (vastausaika enintään) + $40\text{ }\mu\text{s}$ (tilasana ja datasana) = $72\text{ }\mu\text{s}$. Myös digitaalisten ulostulojen kirjoittamiseen tarvittavan BCRT-operaation kesto on enintään $72\text{ }\mu\text{s}$. Jokainen $72\text{ }\mu\text{s}$:n viive siis vastaa yhdelle etäterminaalille sisäänmenojen lukua tai ulostulojen kirjoitusta.

6.2.2 Testijärjestelmän välityskyky

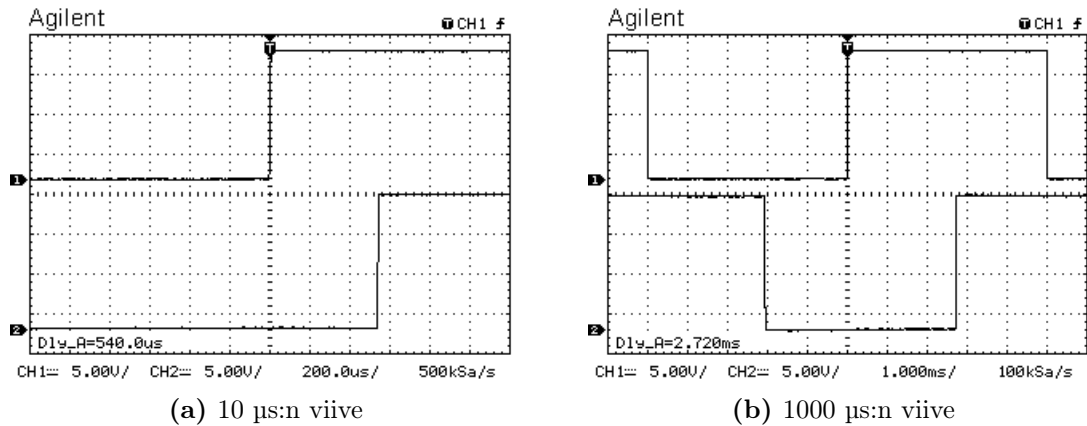
Välityskyvyllä tarkoitetaan väylän kykyä siirtää informaatiota, eli toisin sanoen kyseessä on kaistanleveys tai tiedonsiirtonopeus. Siirrettävä informaatio ei kuitenkaan aina ole taajuustasossa tai bitteinä tarkasteltavissa, joten välityskyky kuvaa parhaiten järjestelmän tehokkuutta. Ensimmäisessä välityskykytestissä käytettiin operaatioiden välillä 10 μ s:n viivettä, jolloin näytteistystaajuus oli vähintään 5,8 kHz. Etäterminaalien vastausviive oli kuitenkin 12 μ s:n asemesta keskimäärin 7 μ s, jolloin käytännön näytteistystaajuudeksi saatiin 6,2 kHz. Nyquistin näytteenottoteoreeman mukaisesti järjestelmän kaistanleveys oli tällöin noin 3 kHz. Kuvassa 6.5a on esitetty 2 kHz:n signaali (yllä) testijärjestelmän kautta kuljetettuna (alla). Testissä havaittiin aaltomuodon välittyvän väylän yli ongelmitta, mutta vasteajasta aiheutuvalla merkittäväällä vaihesiirtymällä. Sama testi toistettiin myös 500 Hz:n signaalilla, joka on esitetty kuvassa 6.5b. Kaistanleveyden äärirajoilla (3 kHz) signaali ei välittynyt testijärjestelmän läpi enää täysin toistettavasti, ja käytännön kaistanleveydeksi saatiin noin 2,9 kHz.



Kuva 6.5: Testijärjestelmän välityskyky

6.2.3 Testijärjestelmän vasteajat

Toisessa testissä tutkittiin järjestelmän vasteaikoja 10 μ s:n ja 1000 μ s:n viiveillä, joista jälkimmäisellä simuloidaan 13 etäterminaalin jatkuvaa toimintaa. Järjestelmän kaistanleveyksiksi saatiin edellä mainituilla viiveillä noin 3 kHz ja 230 Hz. Kuvassa 6.6a on esitetty järjestelmän vasteaika 100 Hz:n testisignaaliilla ja 10 μ s:n operaatioiden välisellä viiveellä. Testijärjestelyn mittausten perusteella digitaalisen sisäänmenon muutos siis vaikuttaa toisen IO-yksikön ulostuloon noin 540 μ s:n viiveellä. Vastaava testi on toistettu kuvassa 6.6b 1000 μ s:n operaatioiden välisellä viiveellä, jolloin järjestelmän vasteajaksi saadaan noin 2720 μ s.



Kuva 6.6: Testijärjestelmän vasteajat

6.3 Tulosten analysointi

6.3.1 Suorituskyky

Kappaleen 6.2 suorituskykytesteissä havaittiin kahden ADIO1:n välisen digitaalisen signaalin siirtoviiveeksi pienimmillään noin 540 µs. Tästä viiveestä MIL-STD-1553-liikenteen osuus on enintään 152 µs (BCRT 72 µs + tauko 4 µs + RTBC 72 µs + tauko 4 µs), joka on alle kolmasosa kokonaisvasteajasta. Merkittävimmät muut viiveet aiheutuvat TRCCOMM-protokollasta ja TRC-rajapinnan sarjaliikenteestä. Myös väyläohjaimen kyselylistojen tulkkaus ja ADIO1:n tapahtumakäsittelijä vievät jonkin verran prosessointiaikaa ja siten kasvattavat viivettä.

Mittausten perusteella toteutettu laitteisto on vasteajoiltaan erittäin hyvä ja järjestelmän suorituskyky riittää todennäköisesti kaikkiin turva-automaation sovelluskohteisiin. Esimerkiksi turvajärjestelmiin tarkoitetun induktiivisen lähestymisanturin vasteaika on tyypillisesti useita millisekunteja [47], ja optisilla heijastusantureilla vasteajat ovat vähintään useita satoja tai jopa tuhansia mikrosekunteja [48]. Toteutettu järjestelmä on siis vasteajoiltaan samassa suuruusluokassa yleisimpien teollisuusanturien kanssa, vaikka väylää kuormitettaisiin useilla jatkuvasti liikennöivillä laitteilla.

6.3.2 Luotettavuus

Valtaosa markkinoilla olevista turvaväyläkomponenteista on SIL3-tason laitteita, jotka on tarkoitettu korkeaa luotettavuutta vaativiin kohteisiin. Korkeimman SIL4-

tason laitteilta vaaditaan muun muassa redundanttista laitteiston toteutusta ja enintään 10^{-8} :n vikaantumistodennäköisyyttä jatkuvan toiminnan toimintatavassa [25]. IEC 61508 -standardin mukainen turvallisuuden eheystason määrittäminen on monimutkainen ja monivaiheinen prosessi, joka rajattiin tämän työn ulkopuolelle. Lisäksi SIL-tason määrittämiseen tarvittavia standardin osia 5 ja 6 ei ollut vastikkeetta saatavilla.

MIL-STD-1553:n fyysisen kahdennuksen, deterministisyyden ja käytännössä todetun luotettavuuden vuoksi ADIO1 luokiteltaisiin väylätoteutuksen osalta todennäköisesti SIL4-tason laitteeksi. Muuten yksittäinen ADIO1 saavuttaisi korkeintaan SIL3-tason, sillä se ei ole muun muassa prosessorin osalta sisäisesti kahdennettu. Mutta kuten jo kappaleessa 6.1.2 todettiin, laitteiston luotettavuutta ei arvioitu mittauksin ja lisäksi yksityiskohtainen luotettavuusanalyysi rajattiin tämän työn ulkopuolelle.

6.3.3 Vertailua kaupallisiin ratkaisuihin

Saksalainen SICK AG on yksi suurimmista anturi- ja automaatiokomponenttivalmistajista. SICK:n UE4400-sarjan hajautetut IO-yksiköt ovat SIL3-tason turva-automaatiokomponentteja, jotka liittyvät enintään 500 kb/s -nopeudella kommunikoivaan DeviceNet Safety -väylään. IO-yksiköt tarjoavat mallista riippuen 2 – 12 kappaletta PNP-tyyppisiä digitaalisia sisäänmenoja ja ulostuloja. Valmistajan poikkeuksellisen kattavassa käyttöoppaassa on käytännön esimerkki UE4400-sarjan laitteilla toteutetun järjestelmän vasteaikojen laskemisesta. Esimerkki vastaa täysin kappaleessa 6.2.1 esiteltyä testijärjestelyä. [46, s. 172 – 175]

UE4400-sarjan IO-yksikön sisäänmenon vasteaika on 15 ms ja ulostulon puolestaan 12 ms. IO-yksikön ja väyläohjaimen väliseen kommunikaatioon kuluu 40 ms, jonka lisäksi väyläohjaimen yhden komentosyklin prosessointi vie 6 ms. Kokonaisuudessaan IO-yksikön sisäänmenon tilan välittäminen väyläohjaimen kautta toisen IO-yksikön ulostuloon kestää SICK:n UE4400-sarjan turva-automaatiokomponenteilla 113 ms. Järjestelmän kaistanleveydeksi saadaan siis alle 5 Hz. Verrattuna tässä työssä toteutettuihin laitteisiin, SICK:n DeviceNet Safety -väylään perustuva järjestelmä on jopa 200 kertaa hitaampi. [46, s. 176 – 180]

Phoenix Contactin *IB IL 24 PSDI 8-PAC* on kahdeksan digitaalisen sisäänmenon tarjoava turva-automaatiokomponentti, joka liittyy enintään 2 Mb/s -nopeudella lii-

kennöivään PROFIsafe-väylään. Samaan tuotesarjaan kuuluva *IB IL 24 PSDO 4/4-PAC* on puolestaan neljäkanavainen digitaalinen ulostulomoduuli. Sisäänmenojen vasteaika määräytyy suodatusviiveen (pienimmillään 1,5 ms) ja ohjelmiston sisäisen 250 μ s:n viiveen perusteella. Tämän lisäksi tulee protokollaviestin 1 ms:n prosessointiaika sekä tiedonsiirtoviive. Ulostulomoduulin kokonaisviive on tiedonsiirtoa lukuun ottamatta 1,5 ms [40] [41]. 2 Mb/s:n enimmäisnopeudella tapahtuva siirto laitteelta väyläohjaimelle kestää ideaalitapauksessa vähintään 270 μ s, kun PROFIsafe-viestin koko on 27 tavua molempiin suuntiin.

Kappaleen 6.2.1 testijärjestelmän vertailu Phoenix Contactin PROFIsafe-komponentteihin on vaikeaa, sillä valmistaja ei tarjoa yksityiskohtaisia tietoja väyläohjaimen ja tiedonsiirron viiveistä. Jos väyläohjaimen viivettä ei huomioida, saadaan edellä olevilla arvoilla vertailukelpoiseksi vasteajaksi noin 4,5 ms – joskin todellisuudessa vasteaika lienee merkittävästi suurempi. Näillä tiedoilla työssä toteutettu laitteisto on kuitenkin yli kahdeksan kertaa PROFIsafe-toteutusta nopeampi, vaikka MIL-STD-1553:n tiedonsiirtonopeus on puolet pienempi. Phoenix Contactin sisäänmenomoduulin teknisissä tiedoissa mainitaan tosin sisäänmenojen enimmäistaajuudeksi 10 Hz, joten todellinen kaistanleveys on merkittävästi koelaitteistoa pienempi [40].

Vertailtaessa tässä työssä toteutetun laitteiston luotettavuutta saatavilla oleviin kaupallisiin ratkaisuihin olisi IEC 61508 -standardin määrittämä turvallisuuden eheystaso vertailukelpoisiin indikaattori. Aiemmin mainittujen syiden vuoksi koelaitteiston SIL-tasoa ei kuitenkaan voitu määrittää, joten myöskään koelaitteiston luotettavuutta ei voida vertailukelpoisesti tarkastella. Sen sijaan koelaitteiston väylätoteutuksen osalta tekninen ylivertaisuus yleisimpiin turvaväyliin nähden on osoitettu lukuisissa sovelluksissa avioniikasta avaruustekniikkaan [1, 2-1]. Deterministinen ja kaksoisredundanttinen MIL-STD-1553 on yksi reaaliaikaisimmista kenttäväylistä, joka muun muassa sietää yksittäisen väyläkaapelin katkeamisen tai oikosulun. Muuntajaerotettuna MIL-STD-1553 on myös luontaisesti turvallinen (intrinsic safe), joten se soveltuu erinomaisesti prosessiteollisuuden räjähdysherkkiin ympäristöihin.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä suunniteltiin ja toteutettiin koelaitteisto, jolla tutkittiin MIL-STD-1553:n soveltuvuutta teollisuuden turvaväyläksi. Lähtökohtana oli oletamus siitä, että MIL-STD-1553 olisi luotettavuudeltaan ja suorituskvyyltään nykyisiä kaupallisia väyläratkaisuja parempi. Tavoitteena oli koelaitteiston ja suorituskvyytimittaus-ten avulla osoittaa, että MIL-STD-1553-väylä soveltuisi sen perinteisen käyttökoh-teiden lisäksi myös turva-automaatioon. Laitteisto koostui kahdesta IO-yksiköstä ja väyläohjaimesta, joiden muodostamasta testijärjestelmästä mitattiin vasteaikoja ja välityskykyä. Mittausten perusteella koelaitteisto on vasteajoiltaan erittäin nopea ja informaation välityskvyyltään erinomainen. Vastaavan järjestelmän vasteajat oli-sivat jopa kaksisataa kertaa tämän työn laitteistoa suurempia, mikäli järjestelmä toteutettaisiin turva-automaatiossa yleiseen DeviceNet Safety -väylään perustuvil-la kaupallisilla komponenteilla. Koelaitteiston luotettavuutta ei mitattu, ja muihin teknologioihin vertailukelpoisen turvallisuuden eheystason määrittäminen rajattiin tämän työn ulkopuolelle.

MIL-STD-1553 on erittäin varmatoiminen väylästandardi, jota käytetään alkuperäi-sen käyttökohteen eli avioniikan lisäksi myös lukuisissa muissa korkean luotettavuu-den sovelluksissa. Teknisten ominaisuuksien ja reaaliaikaisuuden vuoksi se soveltuisi erityisesti kriittisimpiin teollisuuden turva-automaatiojärjestelmiin. MIL-STD-1553-väylän luontainen kahdennus tekee siitä luotettavuuden osalta ylivoimaisen moniin kaupallisiin turvaväyliin verrattuna. Työssä toteutetulla laitteistolla on osoitettu, että MIL-STD-1553:a hyödyntämällä olisi mahdollista parantaa teollisuusprosessien turvallisuutta.

Laitteiston kaupallinen hyödyntäminen vaatisi erilaisten hyväksyntöjen lisäksi IEC 61508 -standardin mukaisen turvallisuuden eheystason määrittämisen sekä mahdollisesti standardin vaatimia muutoksia laitteiston toteutukseen. Lisäksi ohjelmistot tulisi kirjoittaa osittain uusiksi IEC 61508:n vaatimusten mukaisesti.

LÄHTEET

- [1] AIM GmbH: *MIL-STD-1553 Tutorial*. <http://www.aim-online.com/pdf/0VW1553.PDF>, 2002. 82 s. PDF-dokumentti. Viitattu 29.1.2010.
- [2] Analog Devices, Inc.: *AD8664:n datalehti, versio D*. http://www.analog.com/static/imported-files/Data_Sheets/AD8661_8662.pdf, 2006. 16 s. PDF-dokumentti. Viitattu 27.12.2009.
- [3] Analog Devices, Inc.: *AD7794:n datalehti, versio C*. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7794_7795.pdf, 2007. 36 s. PDF-dokumentti. Viitattu 27.12.2009.
- [4] Analog Devices, Inc.: *ADR441:n datalehti, versio C*. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADR440_441_443_444_445.pdf, 2008. 20 s. PDF-dokumentti. Viitattu 27.12.2009.
- [5] Analog Devices, Inc.: *AD5666:n datalehti, versio C*. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5666.pdf, 2009. 28 s. PDF-dokumentti. Viitattu 27.12.2009.
- [6] ARC Advisory Group: *PROFIsafe: Networked Safety for Process and Factory Automation*. http://www.automation.siemens.com/download/internet/cache/3/1365152/pub/de/white_paper_profisafe.pdf, 2006. 20 s. PDF-dokumentti. Viitattu 7.1.2010.
- [7] Atmel Corporation: *AT91SAM7A3:n datalehti*. http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc6042.pdf, 2006. 594 s. PDF-dokumentti. Viitattu 26.12.2009.
- [8] Atmel Corporation: *ATmega644P:n datalehti*. http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8011.pdf, 2009. 439 s. PDF-dokumentti. Viitattu 29.12.2009.
- [9] Avionic Systems Standardisation Committee (ASSC): *ASSC guide to US MIL-STD-1553B/UK DEF STAN 00-18 (part 2)/NATO STANAG 3838 – serial, time division, command/response multiplex data bus standards – ASSC/110/4/41 issue 2 draft*, 2006. 277 s.

- [10] Brinkmann, Matthias: *SafetyBUS p – The First Safe Fieldbus system*. <http://www.can-cia.org/fileadmin/cia/files/icc/7/brinkmann.pdf>, 2001. 5 s. PDF-dokumentti. Viitattu 5.1.2010.
- [11] C-MAC Microtechnology: *RTM1760:n esite*. http://cmac.com/pdf/rtm1760remote2pager_001.pdf, 2008. 2 s. PDF-dokumentti. Viitattu 25.1.2010.
- [12] Casad, Joe ja Willsey, Bob: *TCP/IP Trainer*. Edita, 2001. s. 25.
- [13] Catsoulis, John: *Designing Embedded Hardware*. O'Reilly Media, 2002. s. 160 – 161.
- [14] Condor Engineering, Inc.: *MIL-STD-1553 Tutorial*, 2000. 73 s. Ei julkisesti saatavilla.
- [15] Data Device Corporation: *DDC Ireland Ltd*. <http://www.ddc-web.com/Profile/Ireland.aspx>. HTML-dokumentti. Viitattu 28.1.2010.
- [16] Data Device Corporation: *MIL-STD-1553 Designer's Guide, 6th Edition*. ILC Data Device Corporation, 1998. 367 s.
- [17] Data Device Corporation: *Micro-ACE:n esite*. <http://www.ddc-web.com/Pub/147/337.ashx>, 2002. 4 s. PDF-dokumentti. Viitattu 28.1.2010.
- [18] Gimatic S.p.A.: *Gimaticin tuoteluettelo*. http://www.emiplastics.com/eoat/catalog-pdfs-sensors/eoat_pp0882_0889.pdf, 2008. s. 2. PDF-dokumentti. Viitattu 23.12.2009.
- [19] Haikala, Ilkka ja Märijärvi, Jukka: *Ohjelmistotuotanto, 10. painos*. Talentum, 2004. 440 s.
- [20] Hietikko, Marita, Alanen, Jarmo ja Tiisanen, Risto: *Työkoneiden ja automaation CAN-väyläsovellusten turvallisuus*, nide 1745 sarjassa *VTT Tiedotteita*. VTT, 1996. 100 s. + liitt. 1 s.
- [21] Hirzel, Martin: *G22.3033-002 Scripting Languages*. <http://cs.nyu.edu/courses/summer08/G22.3033-002/2008-0724-other-langs.pdf>, 2008. 12 s. PDF-dokumentti. Viitattu 6.1.2010.

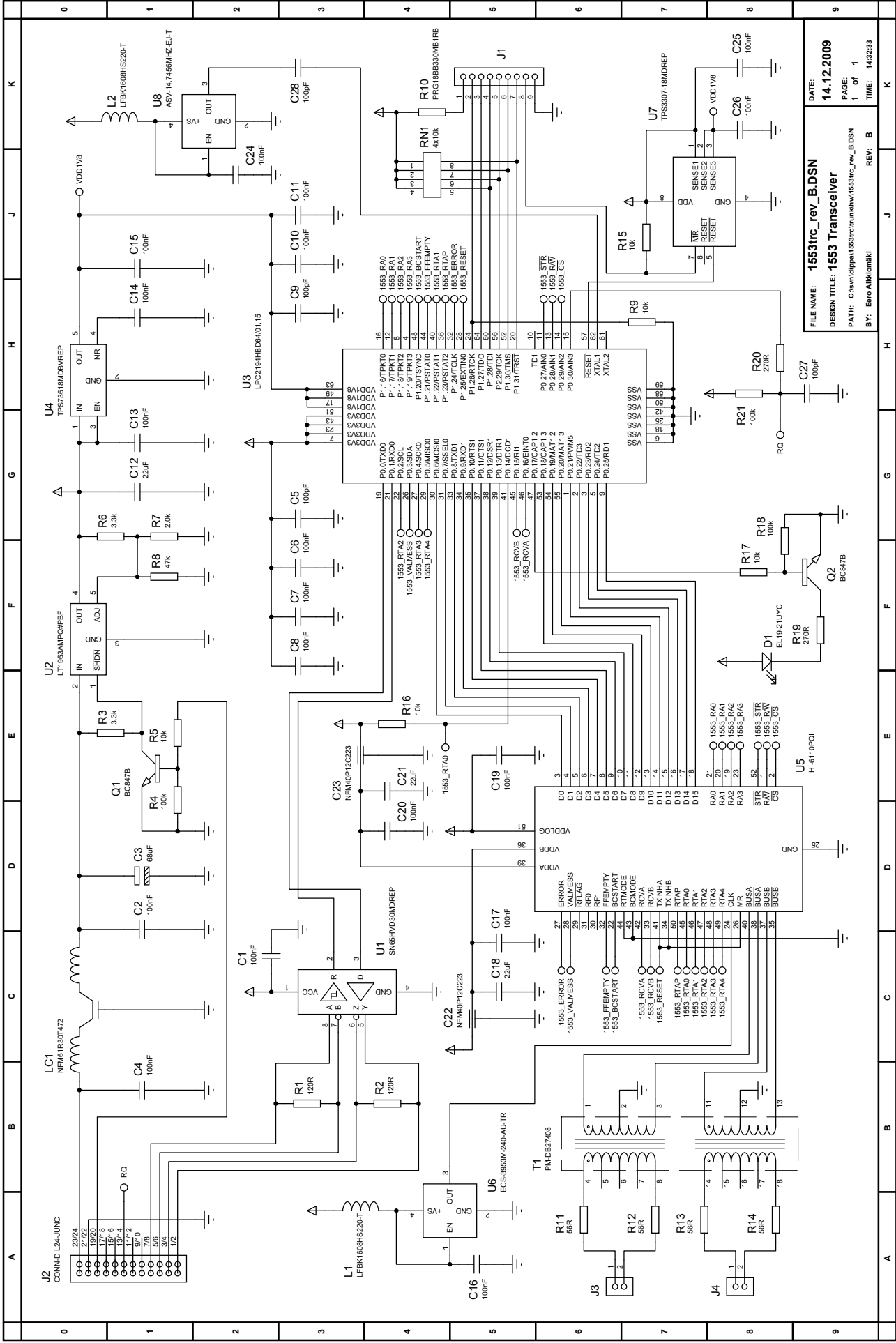
- [22] Holt Integrated Circuits, Inc.: *MIL-STD-1553 Databus products*. http://www.holtic.com/products/mil_std.cfm. HTML-dokumentti. Viitattu 23.12.2009.
- [23] HOLT Integrated Circuits, Inc.: *HI-6110:n datalehti, versio P*. http://www.holtic.com/proPDFs/6110_P.pdf, 2009. 38 s. PDF-dokumentti. Viitattu 28.1.2010.
- [24] HOLT Integrated Circuits, Inc.: *HI-6121:n datalehti*. http://www.holtic.com/proPDFs/6120_NEW.pdf, 2009. 116 s. PDF-dokumentti. Viitattu 28.1.2010.
- [25] International Electrotechnical Commission, IEC: *SFS-käsikirja 175-1*, luku SFS-IEC 61508-1 EN 61508-1. Suomen Standardisoimisliitto SFS, 1 painos, 2006. 468 s.
- [26] International Electrotechnical Commission, IEC: *SFS-käsikirja 175-1*, luku SFS-EN 61508-2. Suomen Standardisoimisliitto SFS, 1 painos, 2006. 468 s.
- [27] International Electrotechnical Commission, IEC: *SFS-käsikirja 175-1*, luku SFS-EN 61508-3 + corr. Suomen Standardisoimisliitto SFS, 1 painos, 2006. 468 s.
- [28] Jim, Brady: *Networking with DeviceNet, Part 1*. http://jbrady.com/devicenet_article_part1.pdf, 1998. 5 s. PDF-dokumentti. Viitattu 7.1.2010.
- [29] Linear Technology Corporation: *LT3431:n datalehti*. <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/3431fs.pdf>, 2003. 28 s. PDF-dokumentti. Viitattu 23.12.2009.
- [30] Linear Technology Corporation: *LT1963A:n datalehti*. <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/1963afd.pdf>, 2005. 28 s. PDF-dokumentti. Viitattu 19.12.2009.
- [31] Marconi Electronic Devices: *MA805:n datalehti*, 1986. 12 s. Viitattu 28.1.2010.
- [32] MilesTek, Inc.: *MIL-STD-1553B Concepts And Considerations*. <http://www.milestek1553.com/tech/PDF/MTI-1553B-40.pdf>, 2007. 2 s. PDF-dokumentti. Viitattu 7.1.2010.

- [33] National Semiconductor Corporation: *LM2592HV:n datalehti*. <http://www.national.com/ds/LM/LM2592HV.pdf>, 2001. 20 s. PDF-dokumentti. Viitattu 29.12.2009.
- [34] National Semiconductor Corporation: *LM2989:n datalehti*. <http://www.national.com/ds/LP/LP2989.pdf>, 2005. 17 s. PDF-dokumentti. Viitattu 25.12.2009.
- [35] National Semiconductor Corporation: *ADC128S052:n datalehti*. <http://www.national.com/ds/DC/ADC128S052.pdf>, 2008. 20 s. PDF-dokumentti. Viitattu 27.12.2009.
- [36] National Semiconductor Corporation: *LM317:n datalehti*. <http://www.national.com/ds/LM/LM117.pdf>, 2008. 28 s. PDF-dokumentti. Viitattu 25.12.2009.
- [37] NXP B.V.: *LPC2194:n datalehti*. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC2194.pdf, 2007. 40 s. PDF-dokumentti. Viitattu 19.12.2009.
- [38] NXP B.V.: *LPC21xx and LPC22xx User Manual*. http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10114.pdf, 2008. 386 s. PDF-dokumentti. Viitattu 27.12.2009.
- [39] Paul, Susanne A., Lee, Hae-Seung et al.: *A Nyquist-Rate Pipelined Oversampling A/D Converter*. <http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/hslee/1777paul.pdf>, 1999. 11 s. PDF-dokumentti. Viitattu 10.2.2010.
- [40] Phoenix Contact GmbH: *User Manual, UM EN IB IL 24 PSDI 8-PAC*. <http://www.phoenixcontact.fi/>, 2008. 146 s. PDF-dokumentti. Viitattu 7.1.2010.
- [41] Phoenix Contact GmbH: *User Manual, UM EN IB IL 24 PSDO 4/4-PAC*. <http://www.phoenixcontact.fi/>, 2009. 108 s. PDF-dokumentti. Viitattu 7.1.2010.
- [42] Premier Magnetics, Inc.: *PM-DBXXX-muuntajien datalehti*. <http://www.premiermag.com/pdf/pm-dbxxx.pdf>, 2009. 11 s. PDF-dokumentti. Viitattu 22.12.2009.
- [43] PROFIBUS & PROFINET International: *PROFIsafe System Description*. <http://www.profibus.com/nc/downloads/downloads/>

- profisafe-technology-and-application-system-description/download/197/, 2007. 24 s. PDF-dokumentti. Viitattu 10.1.2010.
- [44] Real Time Automation, Inc.: *DeviceNet Introduction*. <http://www.rtaautomation.com/devicenet/>. HTML-dokumentti. Viitattu 10.1.2010.
- [45] Schneider Automation: *Advantys STBDDI3725:n datalehti*. http://www.us.telemecanique.com/products/Automation/Distributed_IO/Advantys_STB/AdvantysSTBDDI3725.pdf, 2005. 5 s. PDF-dokumentti. Viitattu 26.12.2009.
- [46] SICK AG: *SICK UE4420:n käyttöohje*. <https://www.mysick.com/saqqara/pdf.aspx?id=im0015157>, 2007. 220 s. PDF-dokumentti. Viitattu 28.1.2010.
- [47] SICK AG: *SICK IN4000:n datalehti*. <https://www.mysick.com/saqqara/pdf.aspx?id=im0026373>, 2008. 8 s. PDF-dokumentti. Viitattu 28.1.2010.
- [48] SICK AG: *SICK VTF180:n datalehti*. <https://www.mysick.com/saqqara/pdf.aspx?id=im0034410>, 2009. 16 s. PDF-dokumentti. Viitattu 7.1.2010.
- [49] Sital Technology Ltd.: *MIL-STD-1553 IP Cores – A Short Introduction to an Emerging Technology*. http://www.sitaltech.com/pdf/WhitePaper_1553IPCores-3.pdf, 2006. 8 s. PDF-dokumentti. Viitattu 28.1.2010.
- [50] SMAR Industrial Automation: *Tutorial DeviceNet*. <http://www.smar.com/devicenet.asp>, 2009. HTML-dokumentti. Viitattu 5.1.2010.
- [51] Stone, F. W.: *Buses for Instruments: VXI and Beyond, IEEE Colloquium*. <http://ieeexplore.ieee.org/iel3/2016/5103/00198281.pdf?arnumber=198281>, 1989. 7 s. PDF-dokumentti. Viitattu 3.2.2010.
- [52] Sundquist, Matti: *Teollisuusautomaation tiedonsiirtoliikenne – Turvaväylät*. In-specta Koulutus Oy, 2008. 159 s.
- [53] Texas Instruments, Inc.: *TPS3307-EP:n datalehti*. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tps3307-18-ep.pdf>, 2005. 16 s. PDF-dokumentti. Viitattu 19.12.2009.
- [54] Texas Instruments, Inc.: *MAX3232-EP:n datalehti*. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/max3232-ep.pdf>, 2009. 13 s. PDF-dokumentti. Viitattu 25.12.2009.

- [55] Texas Instruments, Inc.: *SN65HVD30-EP:n datalehti*. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd30-ep.pdf>, 2009. 25 s. PDF-dokumentti. Viitattu 19.12.2009.
- [56] Texas Instruments, Inc.: *TPS73618-EP:n datalehti*. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tps73615-ep.pdf>, 2009. 24 s. PDF-dokumentti. Viitattu 19.12.2009.
- [57] Tumanski, Slawomir: *Principles of Electrical Measurement*. Taylor & Francis, 2006. s. 400 – 401.
- [58] Turvatekniikan keskus, TUKES: *Turva-automaatio prosessiteollisuudessa*, 2007. 15 s.
- [59] U.S. Department of Defense: *MIL-STD-1553B, aircraft internal time division command/response multilex data bus*, 1978. 34 s.
- [60] U.S. Department of Defense: *MIL-STD-1553B Notice 2, digital time division command/response multilex data bus*, 1986. 13 s.
- [61] U.S. Department of Defense: *MIL-HDBK-1553A, multiplex applications handbook*, 1988. 682 s.
- [62] U.S. Department of State: *Compliance Program Guidelines*. http://www.pmdtc.state.gov/compliance/documents/compliance_programs.pdf, 2007. 4 s. PDF-dokumentti. Viitattu 26.1.2010.
- [63] Vasko, David A.: *DeviceNet Safety: Safety networking for today and beyond*. http://www.odva.org/Portals/0/Library/Publications_Numbered/PUB00110_DeviceNet_Safety_White_Paper.pdf, 2005. 8 s. PDF-dokumentti. Viitattu 5.1.2010.
- [64] Yoshimura, Itaru ja Sato, Yoshinobu: *Safety Achieved by the Safe Failure Fraction (SFF)*. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/24/4378406/04601502.pdf?arnumber=4601502>, 2008. 8 s. PDF-dokumentti. Viitattu 3.2.2010.

LIITE 1: VÄYLÄLIITYNTÄMODUULIN KYTKENTÄKAAVIO



LIITE 2: VÄYLÄLIITYNTÄMODUULIN PIIRILEVYKUVAT

PCB layout overview

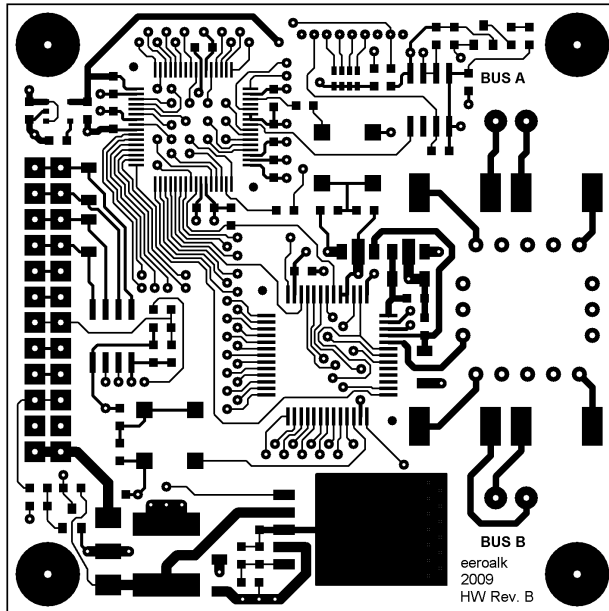
Project: 1553TRC

Date: 14.09.2009

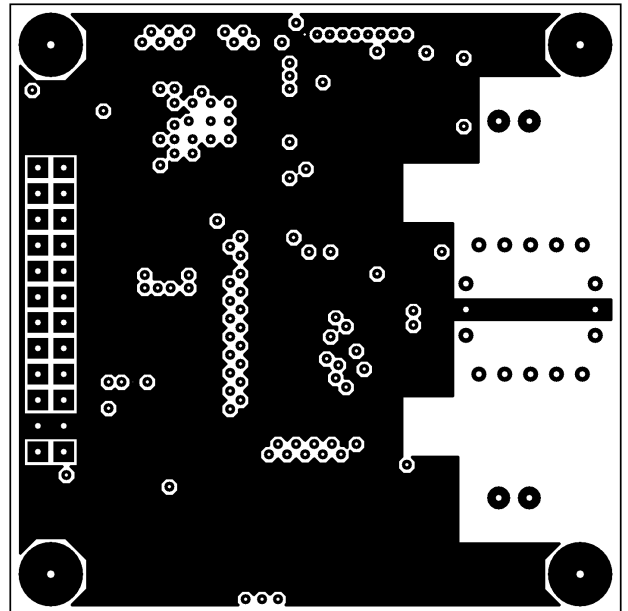
Revision: B

Layout file: 1553trc_rev_B.lyt

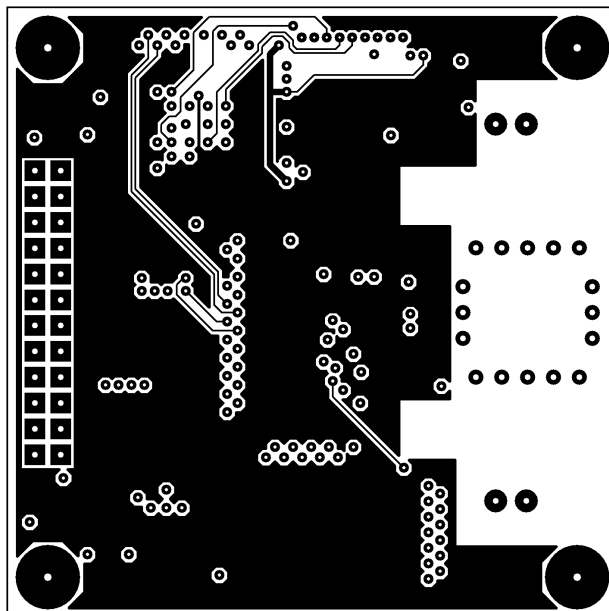
Material: 4 layers 1,6 mm FR4 with 18/35 μm Cu foil



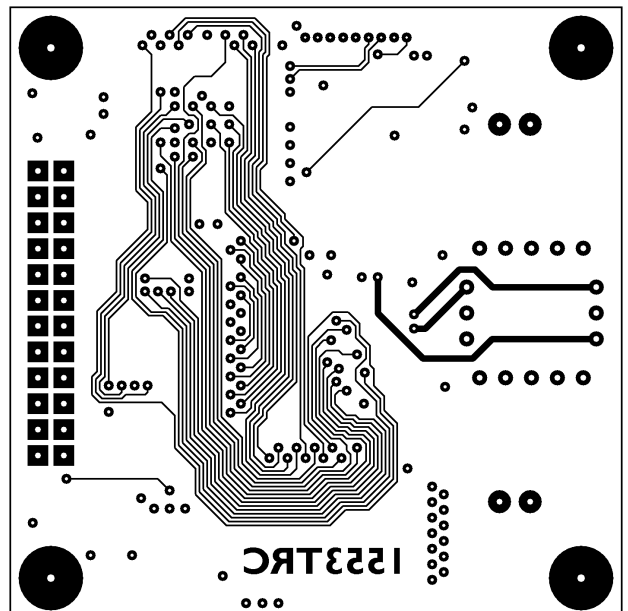
Top copper



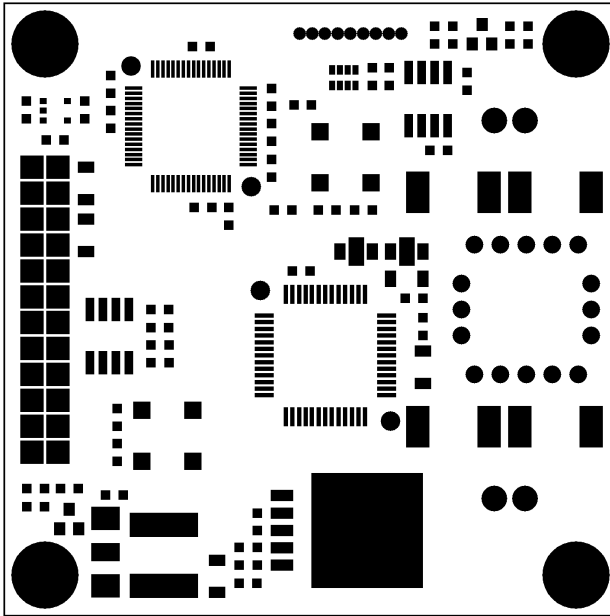
Inner 1



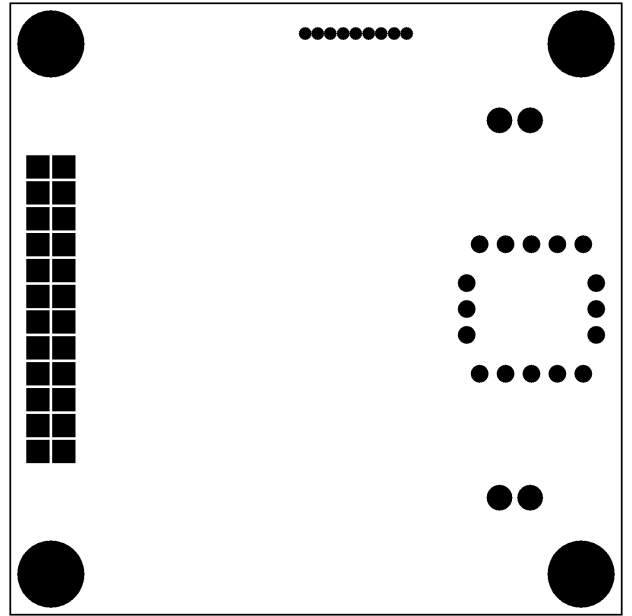
Inner 2



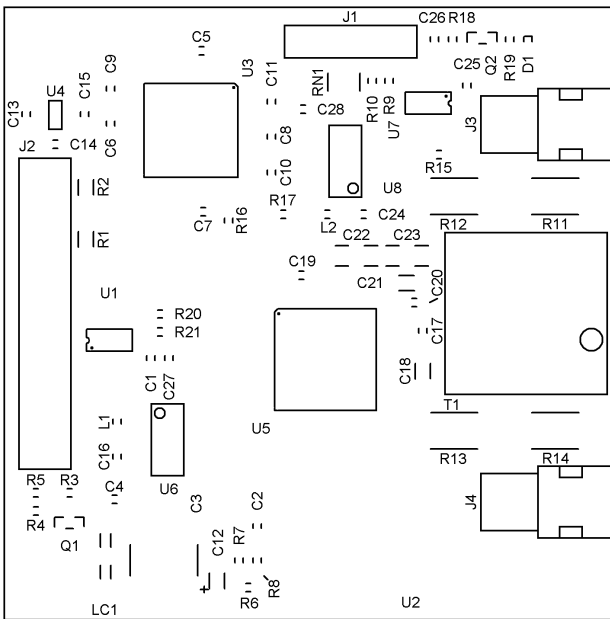
Bottom copper



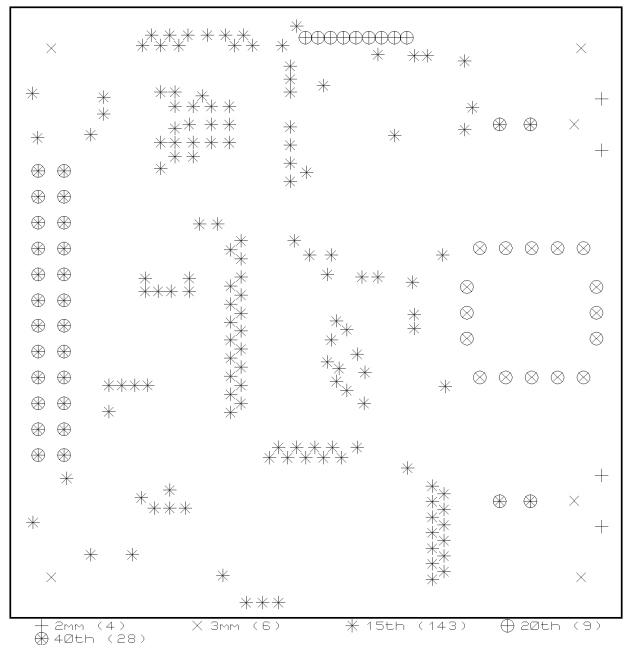
Top solder resist



Bottom solder resist



Top silkscreen



Drill plot

LIITE 3: VÄYLÄLIITYNTÄMODUULIN KOMPONENTTILISTAUS

1553TRC BOM

Project: 1553TRC

Date: 14.09.2009

Revision: B

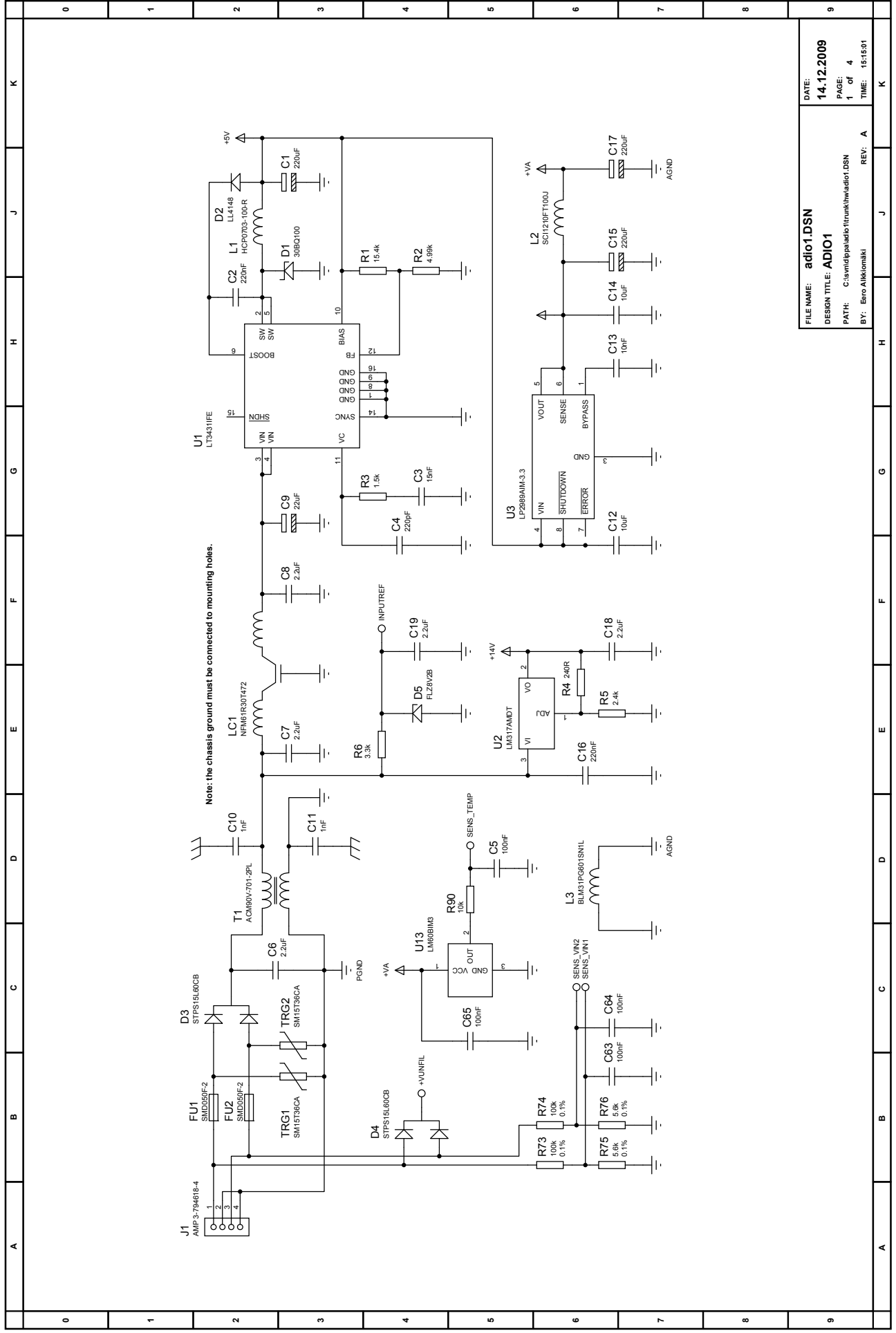
Designer: Eero Alkkiomäki

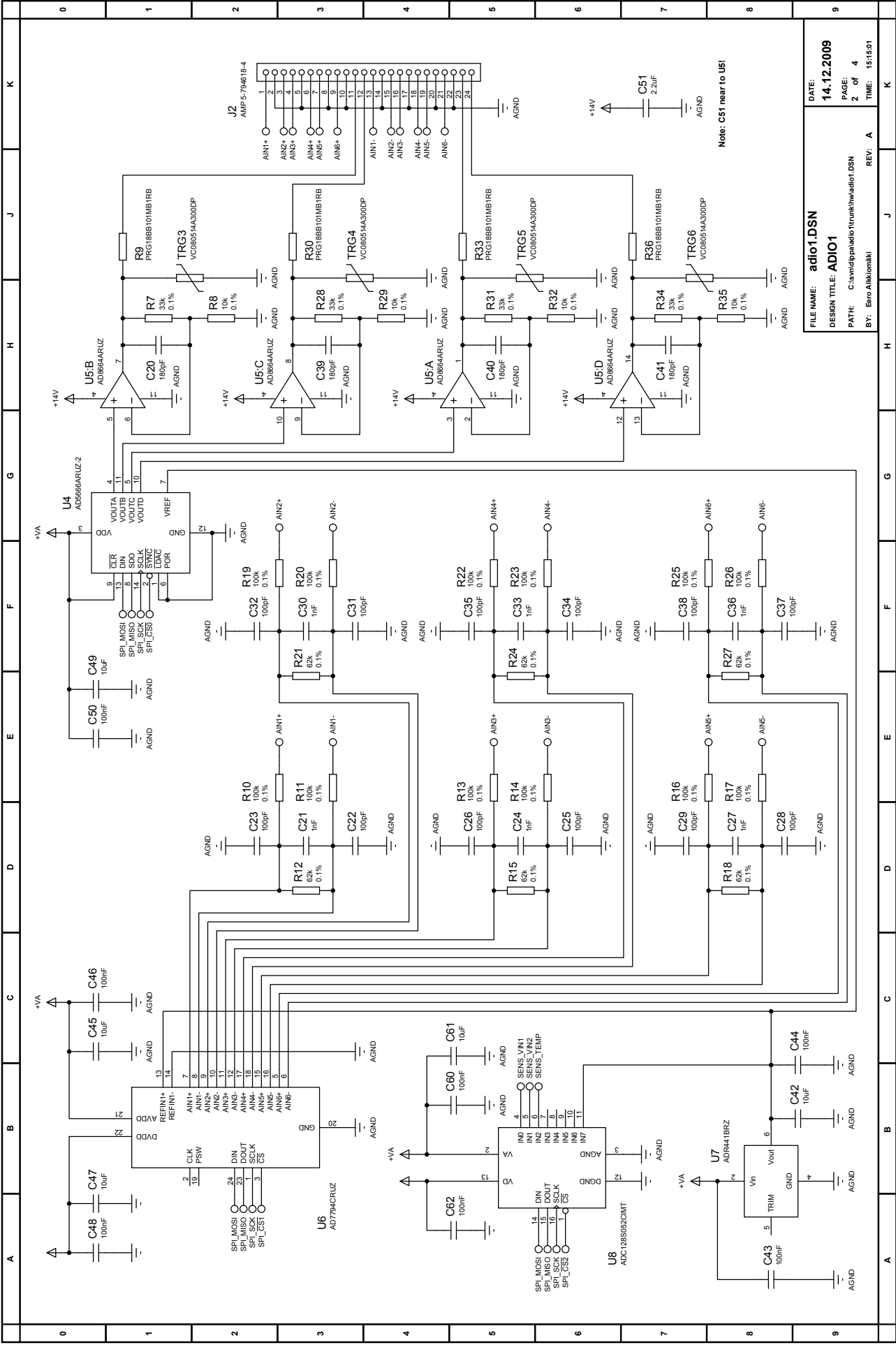
Category	Reference	Value	Package	Description
Resistors	R1	120R	1206	5% metal film / thick film
Resistors	R2	120R	1206	5% metal film / thick film
Resistors	R3	3.3k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R7	2k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R4	100k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R8	47k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R18	100k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R21	100k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R5	10k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R6	3.3k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R9	10k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R15	10k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R16	10k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R17	10k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R10	PRG18BB330MB1RB	0603	PTC resistor
Resistors	R11	56R	2512	Vishay CRCW251256R2FKEG
Resistors	R12	56R	2512	Vishay CRCW251256R2FKEG
Resistors	R13	56R	2512	Vishay CRCW251256R2FKEG
Resistors	R14	56R	2512	Vishay CRCW251256R2FKEG
Resistors	R19	270R	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R20	270R	0603	1% metal film / thick film
Capacitors	C1	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C2	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C4	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C6	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C7	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C8	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C10	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C11	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C13	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C14	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C15	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C16	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C17	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C19	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C20	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C24	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C25	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C26	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C3	68uF	T97/T98-FRZ	Vishay T97R686K025LSA
Capacitors	C5	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C9	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C27	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C28	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C12	22uF	1206	Kemet 10V X5R
Capacitors	C18	22uF	1206	Kemet 10V X5R
Capacitors	C21	22uF	1206	Kemet 10V X5R
Capacitors	C22	NFM40P12C223	EMIFIL-1206	Murata 22nF 50VDC 2A
Capacitors	C23	NFM40P12C223	EMIFIL-1206	Murata 22nF 50VDC 2A

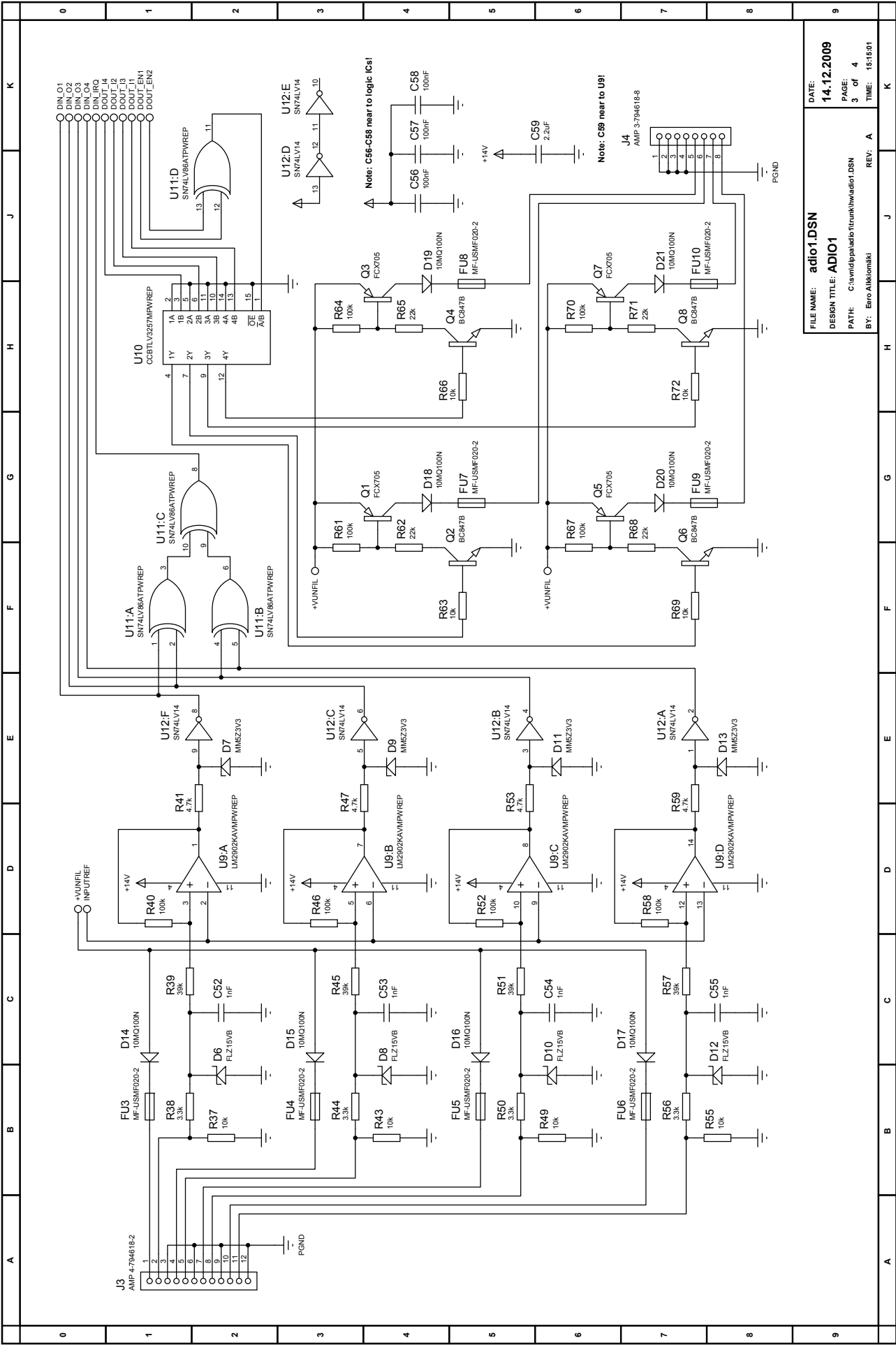
1553TRC BOM

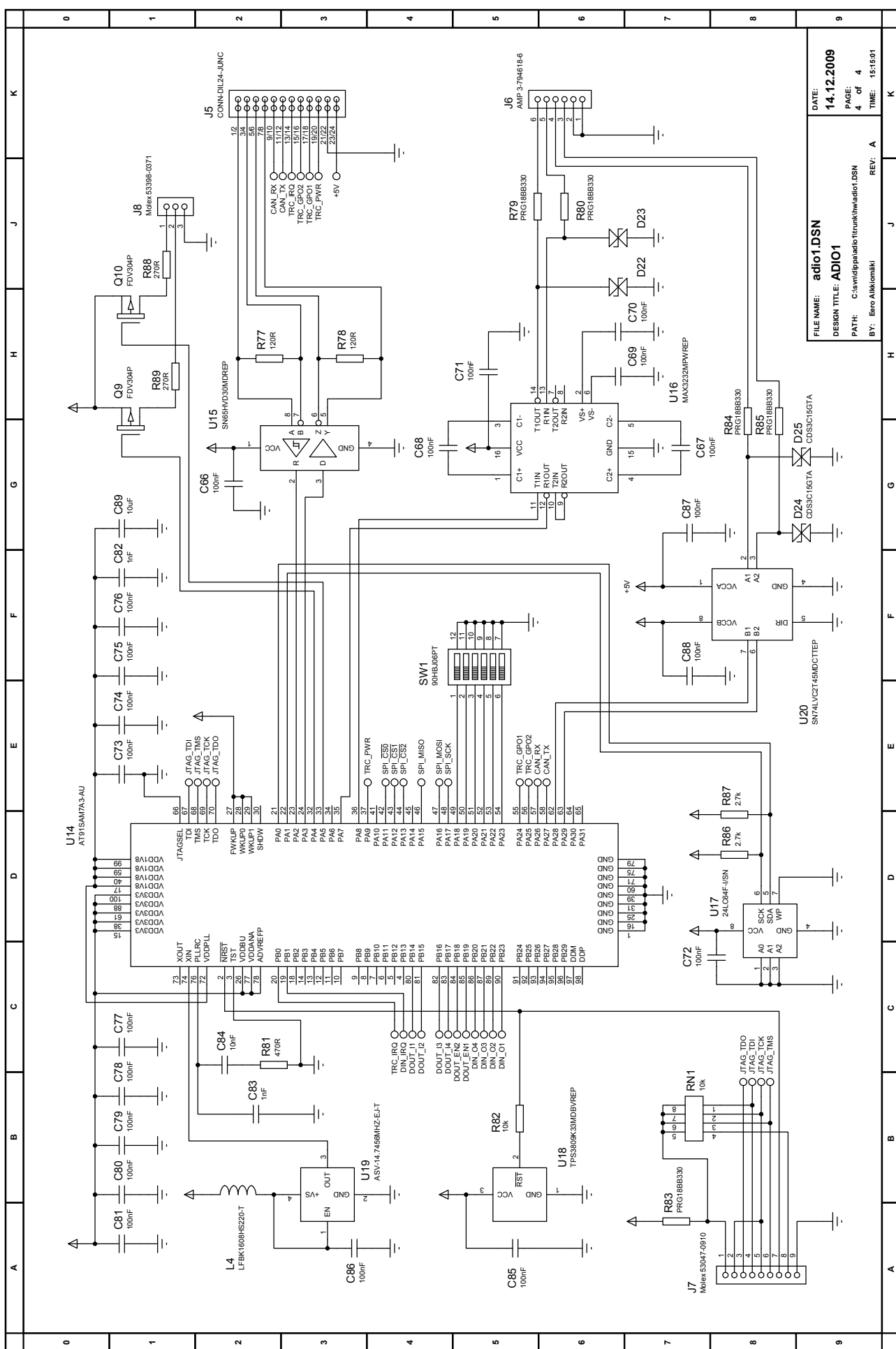
Integrated Circuits	U1	SN65HVD30MDREP	SO8	Texas Instruments
Integrated Circuits	U2	LT1963AMPQ#PBF	TO263-5	Linear Technology
Integrated Circuits	U3	LPC2194HBD64/01,15	SQFP64-10X10	NXP, ARM7
Integrated Circuits	U4	TPS73618MDBVREP	SOT23-5	Texas Instruments
Integrated Circuits	U5	HI-6110PQI	QFP52-10X10	Holt IC, 1553 message processor
Integrated Circuits	U6	ECS-3953M-240-AU-TR	OSC-7MM	ECS, 24 MHz oscillator
Integrated Circuits	U7	TPS3307-18MDREP	SO8	Texas Instruments
Integrated Circuits	U8	ASV-14.7456MHZ-EJ-T	OSC-7MM	Abracon, 14.7456 MHz oscillator
Transistors	Q1	BC847B	SOT23	Vishay
Transistors	Q2	BC847B	SOT23	Vishay
Diodes	D1	EL19-21UYC	0603-LED	Everlight
Miscellaneous	J1	Molex 53047-0910	CRIMP 9 1-25MM	Molex
Miscellaneous	J2	CONN-DIL24-JUNC	CONN-DIL24-STD	AMP
Miscellaneous	J3	AMP 3-794618-2	MICRO-MNL-2NP-TH	AMP
Miscellaneous	J4	AMP 3-794618-2	MICRO-MNL-2NP-TH	AMP
Miscellaneous	L1	LFBK1608HS220-T	0603	Taiyo Yuden
Miscellaneous	L2	LFBK1608HS220-T	0603	Taiyo Yuden
Miscellaneous	LC1	NFM61R30T472	NFM61R30T472	Murata 50VDC 2A
Miscellaneous	RN1	4x10k	1206-RN4	Koa CN
Miscellaneous	T1	PM-DB27408	PM-DB27XXX-H	Premier Magnetics MIL-STD-1553

LIITE 4: IO-YKSIKÖN KYTKENTÄKAAVIO









LIITE 5: IO-YKSIKÖN PIIRILEVYKUVAT

PCB layout overview

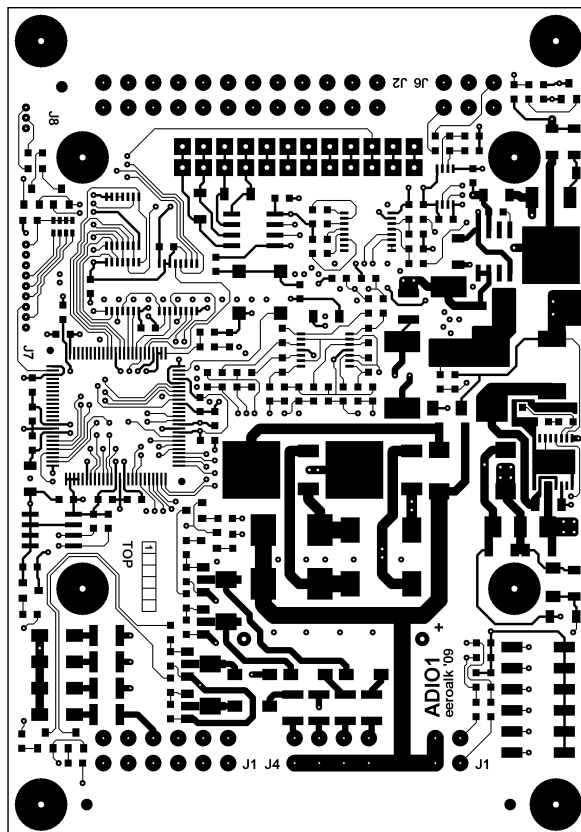
Project: ADIO1

Date: 14.10.2009

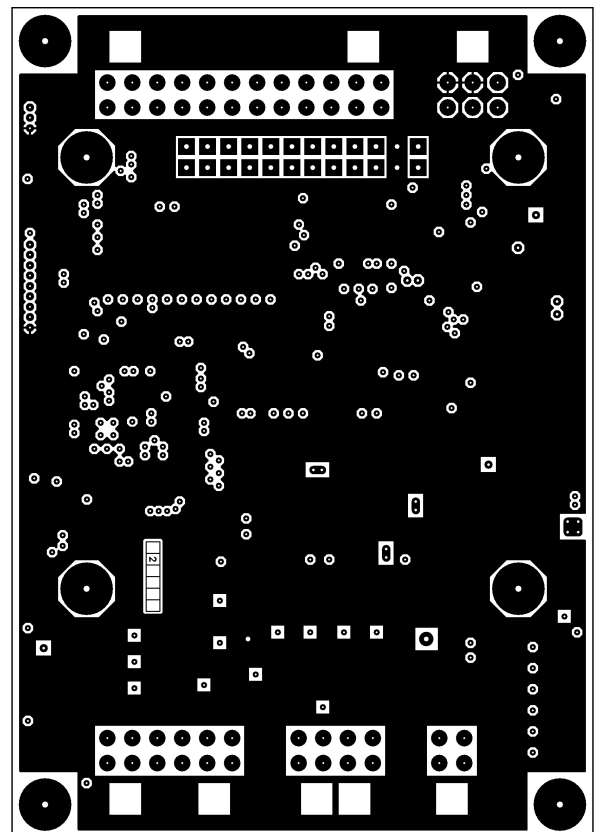
Revision: B

Layout file: adio1.lyt

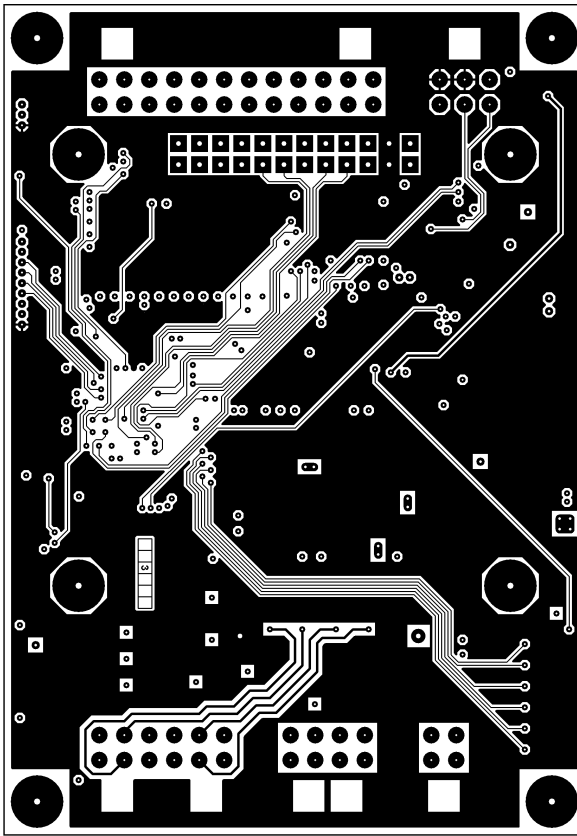
Material: 6 layers 1,6 mm FR4 with 18/35 μm Cu foil



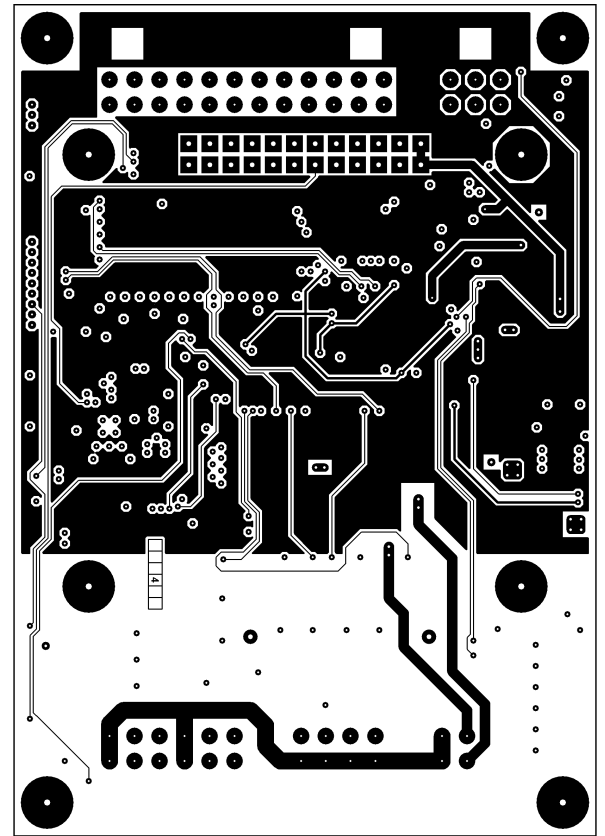
Top copper



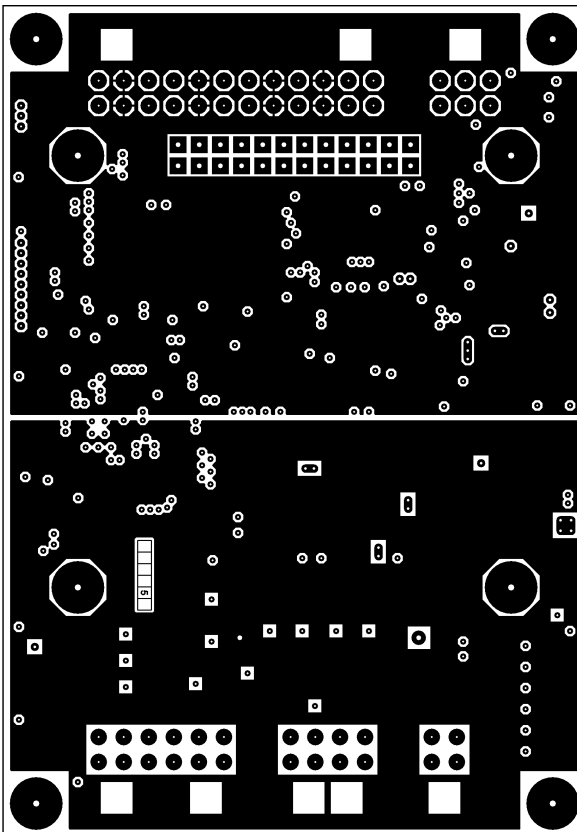
Inner 1 (DGND)



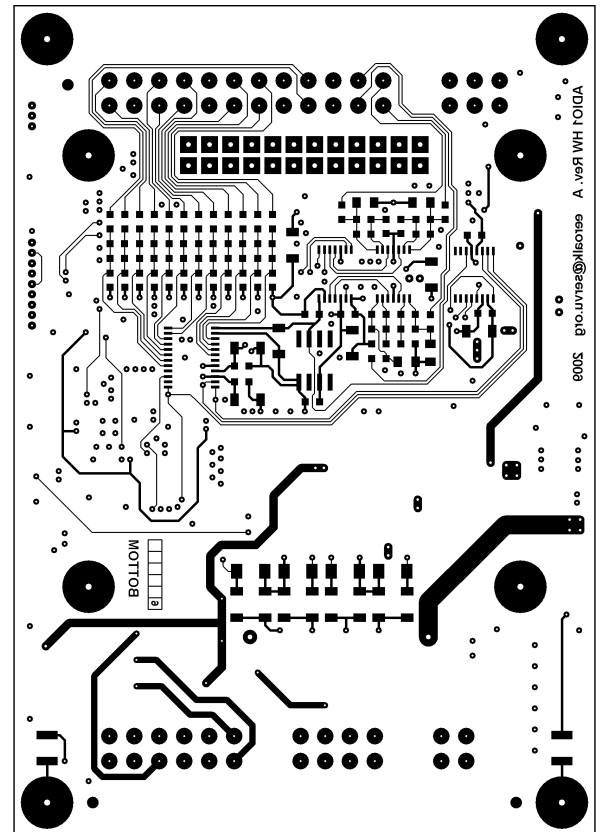
Inner 2 (digital signal)



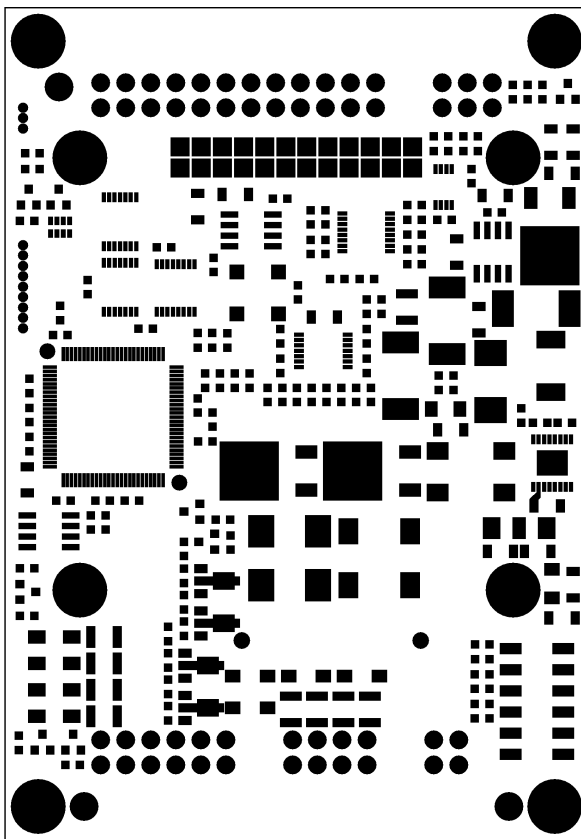
Inner 3 (mixed signal)



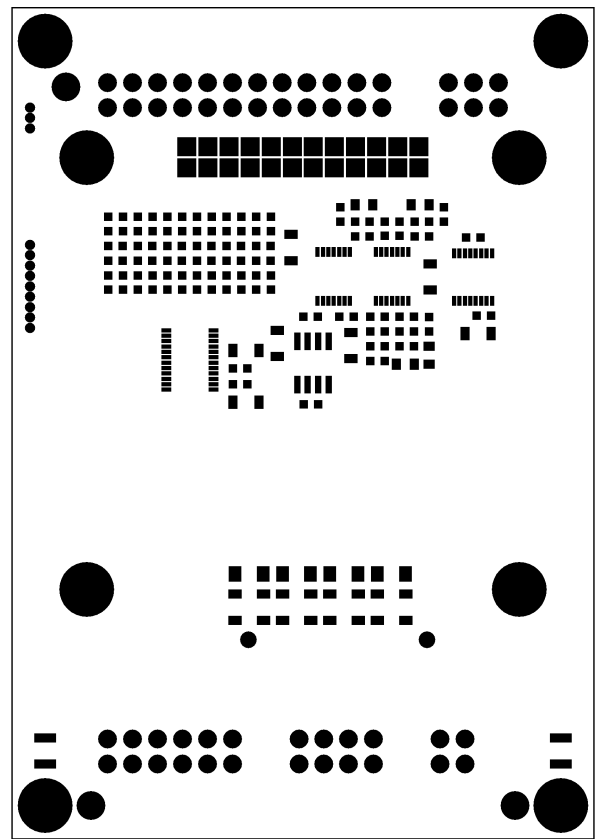
Inner 4 (AGND)



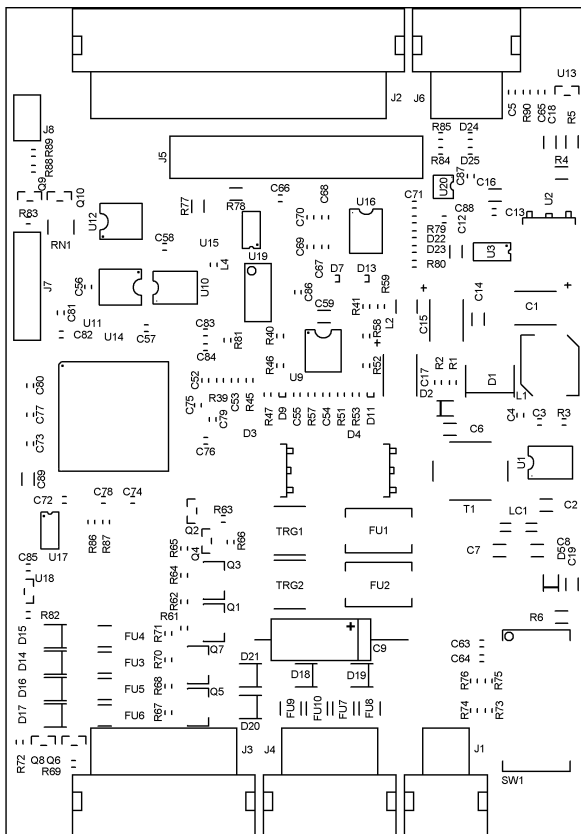
Bottom copper



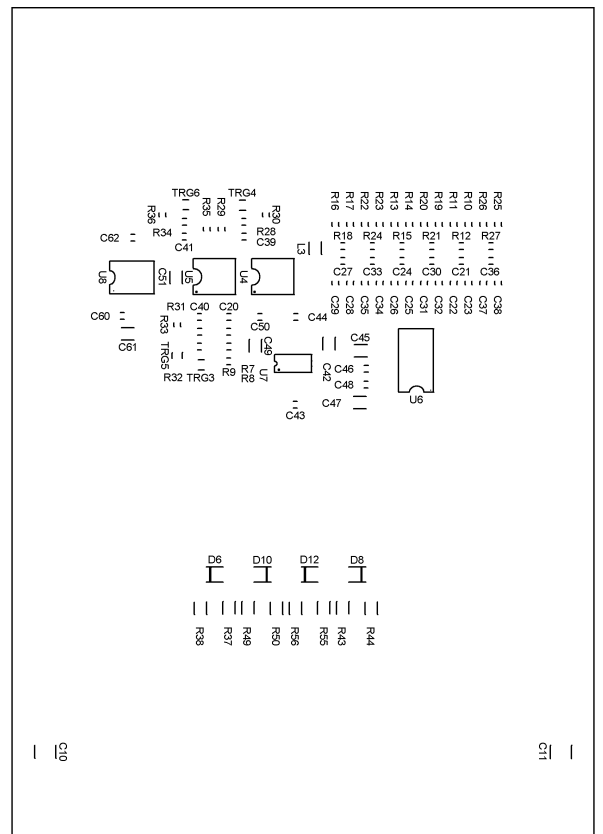
Top solder resist



Bottom solder resist



Top silkscreen



Bottom silkscreen

LIITE 6: IO-YKSIKÖN KOMPONENTTILISTAUS

ADIO1 BOM

Project: ADIO1

Date: 15.10.2009

Revision: A

Designer: Eero Alkkiomäki

Category	Reference	Value	Package	Description
Resistors	R1	15.4k	0603	1% thick film
Resistors	R2	4.99k	0603	1% thick film
Resistors	R3	1.5k	0603	1% thick film
Resistors	R81	1.5k	0603	1% thick film
Resistors	R4	240R	1206	1% thick film
Resistors	R5	2.4k	1206	1% thick film
Resistors	R6	3.3k	1206	1% thick film
Resistors	R38	3.3k	1206	1% thick film
Resistors	R44	3.3k	1206	1% thick film
Resistors	R50	3.3k	1206	1% thick film
Resistors	R56	3.3k	1206	1% thick film
Resistors	R7	33k	0603	Panasonic ERA-3AEB333V
Resistors	R28	33k	0603	Panasonic ERA-3AEB333V
Resistors	R31	33k	0603	Panasonic ERA-3AEB333V
Resistors	R34	33k	0603	Panasonic ERA-3AEB333V
Resistors	R8	10k	0603	Panasonic ERA-3AEB103V
Resistors	R29	10k	0603	Panasonic ERA-3AEB103V
Resistors	R32	10k	0603	Panasonic ERA-3AEB103V
Resistors	R35	10k	0603	Panasonic ERA-3AEB103V
Resistors	R63	10k	0603	1% thick film
Resistors	R66	10k	0603	1% thick film
Resistors	R69	10k	0603	1% thick film
Resistors	R72	10k	0603	1% thick film
Resistors	R82	10k	0603	1% thick film
Resistors	R90	10k	0603	1% thick film
Resistors	R9	PRG18BB101MB1RB	0603	PTC 100R
Resistors	R30	PRG18BB101MB1RB	0603	PTC 100R
Resistors	R33	PRG18BB101MB1RB	0603	PTC 100R
Resistors	R36	PRG18BB101MB1RB	0603	PTC 100R
Resistors	R10	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R11	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R13	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R14	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R16	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R17	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R19	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R20	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R22	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R23	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R25	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R26	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R40	100k	0603	1% thick film
Resistors	R46	100k	0603	1% thick film
Resistors	R52	100k	0603	1% thick film
Resistors	R58	100k	0603	1% thick film
Resistors	R61	100k	0603	1% thick film
Resistors	R64	100k	0603	1% thick film
Resistors	R67	100k	0603	1% thick film
Resistors	R70	100k	0603	1% thick film

ADIO1 BOM

Resistors	R73	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R74	100k	0603	Panasonic ERA-3AEB104V
Resistors	R12	62k	0603	Panasonic ERA-3AEB623V
Resistors	R15	62k	0603	Panasonic ERA-3AEB623V
Resistors	R18	62k	0603	Panasonic ERA-3AEB623V
Resistors	R21	62k	0603	Panasonic ERA-3AEB623V
Resistors	R24	62k	0603	Panasonic ERA-3AEB623V
Resistors	R27	62k	0603	Panasonic ERA-3AEB623V
Resistors	R37	10k	1206	1% thick film
Resistors	R43	10k	1206	1% thick film
Resistors	R49	10k	1206	1% thick film
Resistors	R55	10k	1206	1% thick film
Resistors	R39	39k	0603	1% thick film
Resistors	R45	39k	0603	1% thick film
Resistors	R51	39k	0603	1% thick film
Resistors	R57	39k	0603	1% thick film
Resistors	R41	4.7k	0603	1% thick film
Resistors	R47	4.7k	0603	1% thick film
Resistors	R53	4.7k	0603	1% thick film
Resistors	R59	4.7k	0603	1% thick film
Resistors	R62	22k	0603	1% thick film
Resistors	R65	22k	0603	1% thick film
Resistors	R68	22k	0603	1% thick film
Resistors	R71	22k	0603	1% thick film
Resistors	R75	5.6k	0603	Panasonic ERA-3AEB562V
Resistors	R76	5.6k	0603	Panasonic ERA-3AEB562V
Resistors	R77	120R	1206	5% metal film / thick film
Resistors	R78	120R	1206	5% metal film / thick film
Resistors	R79	PRG18BB330	0603	PTC 33R
Resistors	R80	PRG18BB330	0603	PTC 33R
Resistors	R83	PRG18BB330	0603	PTC 33R
Resistors	R84	PRG18BB330	0603	PTC 33R
Resistors	R85	PRG18BB330	0603	PTC 33R
Resistors	R86	2.7k	0603	1% thick film
Resistors	R87	2.7k	0603	1% thick film
Resistors	R88	270R	0603	1% thick film
Resistors	R89	270R	0603	1% thick film
Capacitors	C1	220uF	TANT-D	Kemet T520D227M01
Capacitors	C15	220uF	TANT-D	Kemet T520D227M01
Capacitors	C17	220uF	TANT-D	Kemet T520D227M01
Capacitors	C2	220nF	1206	Murata GCM31MR72A224
Capacitors	C16	220nF	1206	Murata GCM31MR72A224
Capacitors	C3	15nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C4	220pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C5	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C43	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C44	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C46	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C48	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C50	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C56	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C57	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C58	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C60	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C62	100nF	0603	Kemet 16V X7R

ADIO1 BOM

Capacitors	C63	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C64	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C65	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C66	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C67	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C68	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C69	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C70	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C71	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C72	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C73	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C74	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C75	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C76	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C77	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C78	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C79	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C80	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C81	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C85	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C86	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C87	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C88	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C6	2.2uF	1206	Murata GCM31CR71H225
Capacitors	C7	2.2uF	1206	Murata GCM31CR71H225
Capacitors	C8	2.2uF	1206	Murata GCM31CR71H225
Capacitors	C18	2.2uF	1206	Murata GCM31CR71H225
Capacitors	C19	2.2uF	1206	Murata GCM31CR71H225
Capacitors	C51	2.2uF	1206	Murata GCM31CR71H225
Capacitors	C59	2.2uF	1206	Murata GCM31CR71H225
Capacitors	C9	22uF	MILTAN-C	Vishay 135D226X9075C6
Capacitors	C10	1nF	1210	Johanson 202S41W102
Capacitors	C11	1nF	1210	Johanson 202S41W102
Capacitors	C12	10uF	1206	Kemet C1206C106K8RA
Capacitors	C14	10uF	1206	Kemet C1206C106K8RA
Capacitors	C42	10uF	1206	Kemet C1206C106K8RA
Capacitors	C45	10uF	1206	Kemet C1206C106K8RA
Capacitors	C47	10uF	1206	Kemet C1206C106K8RA
Capacitors	C49	10uF	1206	Kemet C1206C106K8RA
Capacitors	C61	10uF	1206	Kemet C1206C106K8RA
Capacitors	C89	10uF	1206	Kemet C1206C106K8RA
Capacitors	C13	10nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C84	10nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C20	180pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C39	180pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C40	180pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C41	180pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C21	1nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C24	1nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C27	1nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C30	1nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C33	1nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C36	1nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C52	1nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C53	1nF	0603	Kemet 50V X7R

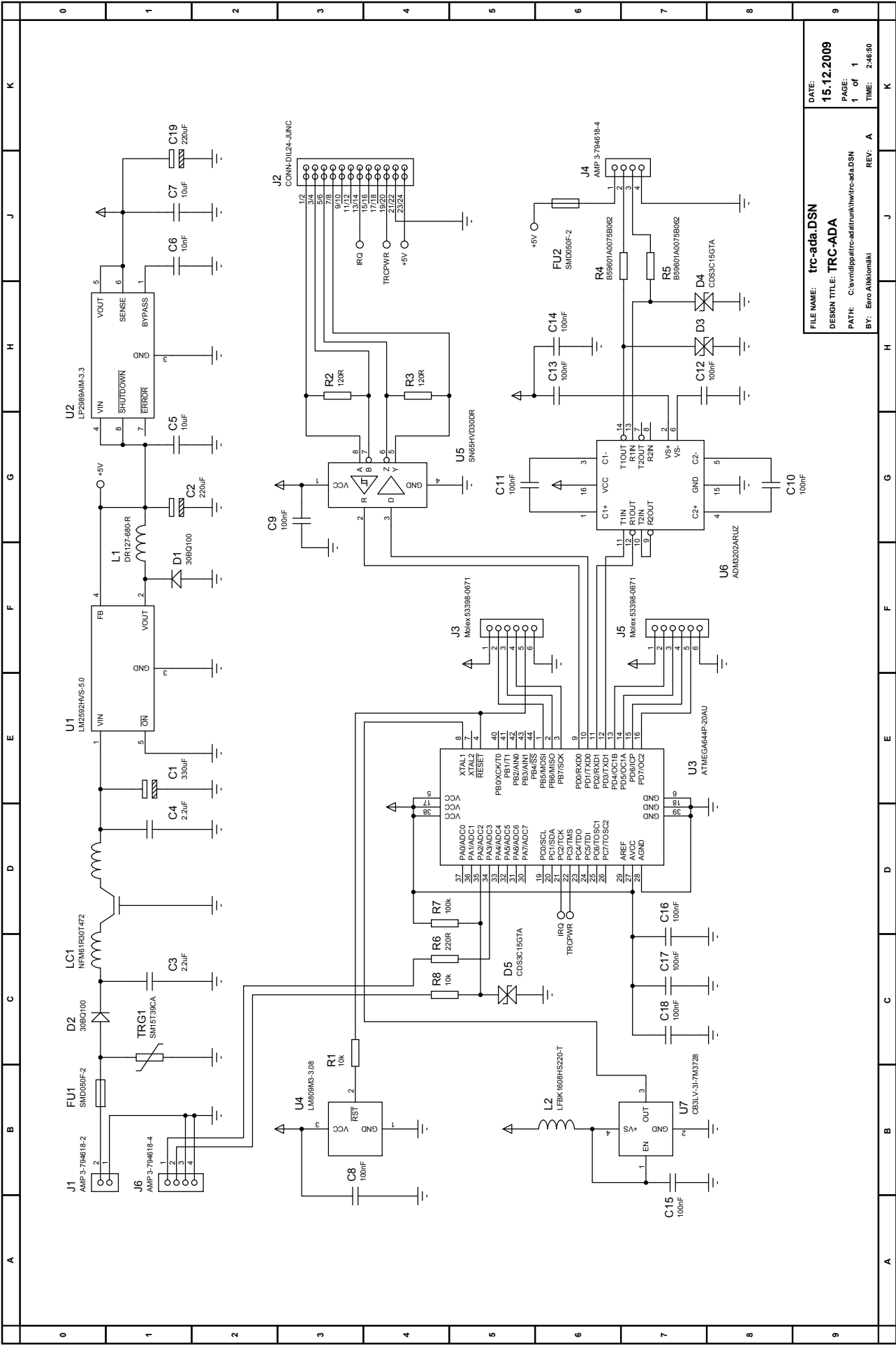
ADIO1 BOM

Capacitors	C54	1nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C55	1nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C82	1nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C83	1nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C22	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C23	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C25	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C26	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C28	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C29	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C31	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C32	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C34	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C35	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C37	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Capacitors	C38	100pF	0603	Kemet 50V NP0
Integrated Circuits	U1	LT3431IFE	TSSOP16E	mfr=Linear Technologies
Integrated Circuits	U2	LM317AMDT	DPAK	mfr=National
Integrated Circuits	U3	LP2989AIM-3.3	SO8	mfr=National
Integrated Circuits	U4	AD5666ARUZ-2	TSSOP14	mfr=Analog Devices
Integrated Circuits	U5	AD8664ARUZ	TSSOP14	mfr=Analog Devices
Integrated Circuits	U6	AD7794CRUZ	TSSOP24	mfr=Analog Devices
Integrated Circuits	U7	ADR441BRZ	SO8	mfr=Analog Devices
Integrated Circuits	U8	ADC128S022CIMT	TSSOP16	mfr=National
Integrated Circuits	U9	LM2902KAVMPWREP	TSSOP14	mfr=Texas Instruments
Integrated Circuits	U10	CCBTLV3257MPWREP	TSSOP16	mfr=Texas Instruments
Integrated Circuits	U11	SN74LV86ATPWREP	TSSOP14	mfr=Texas Instruments
Integrated Circuits	U12	SN74LV14	TSSOP14	mfr=Texas Instruments
Integrated Circuits	U13	LM60BIM3	SOT23	mfr=National
Integrated Circuits	U14	AT91SAM7A3-AU	SQFP100-14X14	mfr=Atmel
Integrated Circuits	U15	SN65HVD30MDREP	SO8	mfr=Texas Instruments
Integrated Circuits	U16	MAX3232MPWREP	TSSOP16	mfr=Texas Instruments
Integrated Circuits	U17	24LC64F-I/SN	SO8	mfr=Microchip
Integrated Circuits	U18	TPS3809K33MDBVREP	SOT23	mfr=Texas Instruments
Integrated Circuits	U19	ASV-14.7456MHZ-EJ-T	OSC-7MM	mfr=Abracon
Integrated Circuits	U20	SN74LVC2T45MDCTTEP	TSSOP8	mfr=Texas Instruments
Transistors	Q1	FCX705	SOT89	mfr=Diodes/Zetex
Transistors	Q3	FCX705	SOT89	mfr=Diodes/Zetex
Transistors	Q5	FCX705	SOT89	mfr=Diodes/Zetex
Transistors	Q7	FCX705	SOT89	mfr=Diodes/Zetex
Transistors	Q2	BC847B	SOT23	mfr=Infineon
Transistors	Q4	BC847B	SOT23	mfr=Infineon
Transistors	Q6	BC847B	SOT23	mfr=Infineon
Transistors	Q8	BC847B	SOT23	mfr=Infineon
Transistors	Q9	FDV304P	SOT23	mfr=Fairchild
Transistors	Q10	FDV304P	SOT23	mfr=Fairchild
Diodes	D1	30BQ100	SMC	Vishay VS-30BQ100TR
Diodes	D2	LL4148	SOD80	mfr=Vishay
Diodes	D3	STPS15L60CB	DPAK-D6	mfr=STM
Diodes	D4	STPS15L60CB	DPAK-D6	mfr=STM
Diodes	D5	FLZ8V2B	SOD80	mfr=Fairchild
Diodes	D6	FLZ15VB	SOD80	mfr=Fairchild
Diodes	D8	FLZ15VB	SOD80	mfr=Fairchild
Diodes	D10	FLZ15VB	SOD80	mfr=Fairchild
Diodes	D12	FLZ15VB	SOD80	mfr=Fairchild

ADIO1 BOM

Diodes	D7	MM5Z3V3	0603-DIODE	mfr=Fairchild
Diodes	D9	MM5Z3V3	0603-DIODE	mfr=Fairchild
Diodes	D11	MM5Z3V3	0603-DIODE	mfr=Fairchild
Diodes	D13	MM5Z3V3	0603-DIODE	mfr=Fairchild
Diodes	D14	10MQ100N	SMA	Vishay VS-10MQ100NTR
Diodes	D15	10MQ100N	SMA	Vishay VS-10MQ100NTR
Diodes	D16	10MQ100N	SMA	Vishay VS-10MQ100NTR
Diodes	D17	10MQ100N	SMA	Vishay VS-10MQ100NTR
Diodes	D18	10MQ100N	SMA	Vishay VS-10MQ100NTR
Diodes	D19	10MQ100N	SMA	Vishay VS-10MQ100NTR
Diodes	D20	10MQ100N	SMA	Vishay VS-10MQ100NTR
Diodes	D21	10MQ100N	SMA	Vishay VS-10MQ100NTR
Diodes	D22	CDS3C15GTA	0603	mfr=Epcos
Diodes	D23	CDS3C15GTA	0603	mfr=Epcos
Diodes	D24	CDS3C15GTA	0603	mfr=Epcos
Diodes	D25	CDS3C15GTA	0603	mfr=Epcos
Miscellaneous	FU1	SMD050F-2	POLYFUSE-SMD	mfr=Tyco
Miscellaneous	FU2	SMD050F-2	POLYFUSE-SMD	mfr=Tyco
Miscellaneous	FU3	MF-USMF020-2	1210	mfr=Bourns
Miscellaneous	FU4	MF-USMF020-2	1210	mfr=Bourns
Miscellaneous	FU5	MF-USMF020-2	1210	mfr=Bourns
Miscellaneous	FU6	MF-USMF020-2	1210	mfr=Bourns
Miscellaneous	FU7	MF-USMF020-2	1210	mfr=Bourns
Miscellaneous	FU8	MF-USMF020-2	1210	mfr=Bourns
Miscellaneous	FU9	MF-USMF020-2	1210	mfr=Bourns
Miscellaneous	FU10	MF-USMF020-2	1210	mfr=Bourns
Miscellaneous	J1	AMP 3-794618-4	MICRO-MNL-4NPR-TH	mfr=AMP
Miscellaneous	J2	AMP 5-794618-4	MICRO-MNL-24NPR-TH	mfr=AMP
Miscellaneous	J3	AMP 4-794618-2	MICRO-MNL-12NPR-TH	mfr=AMP
Miscellaneous	J4	AMP 3-794618-8	MICRO-MNL-8NPR-TH	mfr=AMP
Miscellaneous	J5	CONN-DIL24-JUNC	CONN-DIL24-STD	mfr=AMP
Miscellaneous	J6	AMP 3-794618-6	MICRO-MNL-6NPR-TH	mfr=AMP
Miscellaneous	J7	Molex 53047-0910	CRIMP 09 1-25MM	mfr=Molex
Miscellaneous	J8	Molex 53398-0371	CRIMP 03 1-25MM	mfr=Molex
Miscellaneous	L1	HCP0703-100-R	HCP0703	mfr=Cooper/Bussmann
Miscellaneous	L2	SCI1210FT100J	1210	mfr=AOBA Tech
Miscellaneous	L3	BLM31PG601SN1L	1206	mfr=Murata
Miscellaneous	L4	LFBK1608HS220-T	0603	mfr=Taiyo Yuden
Miscellaneous	LC1	NFM61R30T472	NFM61R30T472	mfr=Murata
Miscellaneous	RN1	10k	RN4	CTS 744C083103JPTR
Miscellaneous	SW1	90HBJ06PT	DIP12-JB	mfr=Grayhill
Miscellaneous	T1	ACM90V-701-2PL	ACM90V	mfr=TDK
Miscellaneous	TRG1	SM15T36CA	SMC-UNPOL	mfr=STM
Miscellaneous	TRG2	SM15T36CA	SMC-UNPOL	mfr=STM
Miscellaneous	TRG3	VC080514A300DP	0805	mfr=AVX
Miscellaneous	TRG4	VC080514A300DP	0805	mfr=AVX
Miscellaneous	TRG5	VC080514A300DP	0805	mfr=AVX
Miscellaneous	TRG6	VC080514A300DP	0805	mfr=AVX

LIITE 7: TRC-ADA:N KYTKENTÄKAAVIO



LIITE 8: TRC-ADA:N PIIRILEVYKUVAT

PCB layout overview

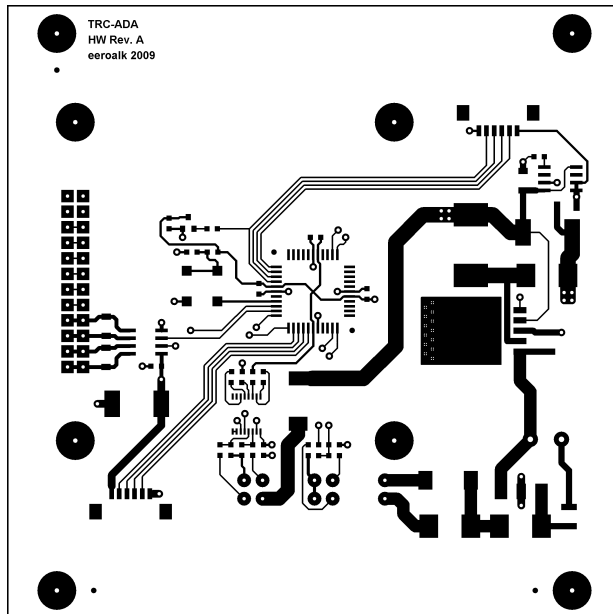
Project: TRC-ADA

Date: 04.09.2009

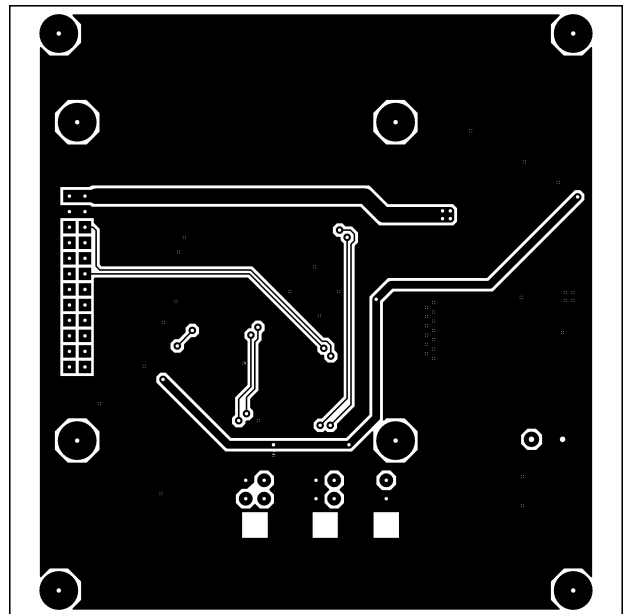
Revision: A

Layout file: trc-ada.lyt

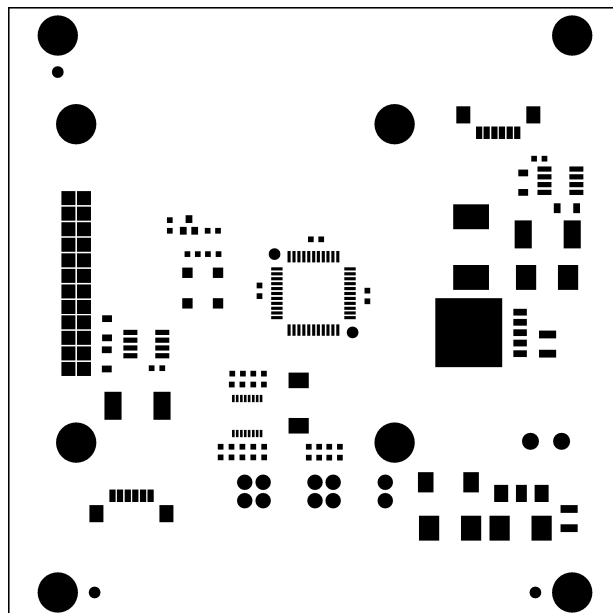
Material: double-sided 1,6 mm FR4 with 35 µm Cu foil



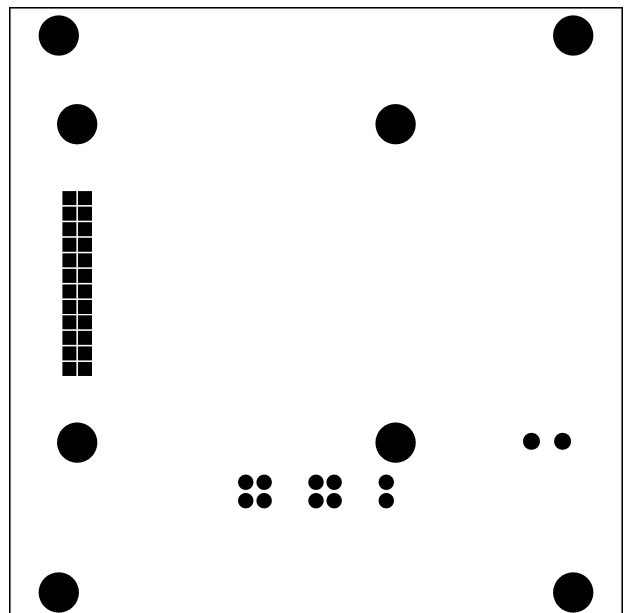
Top copper



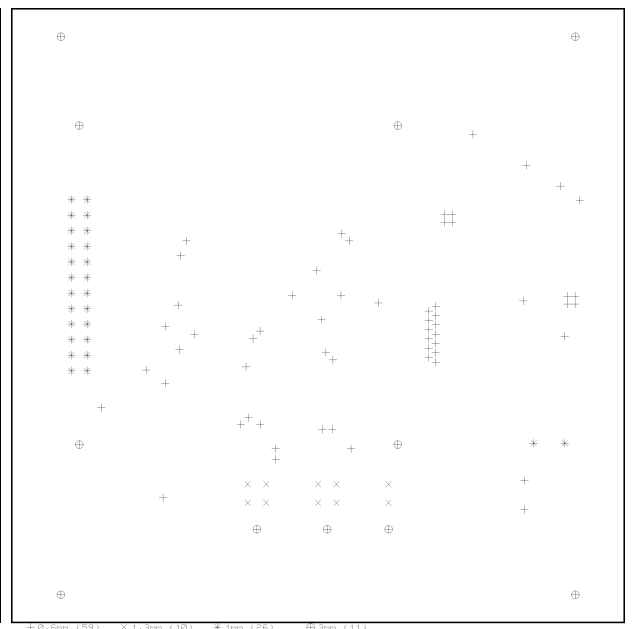
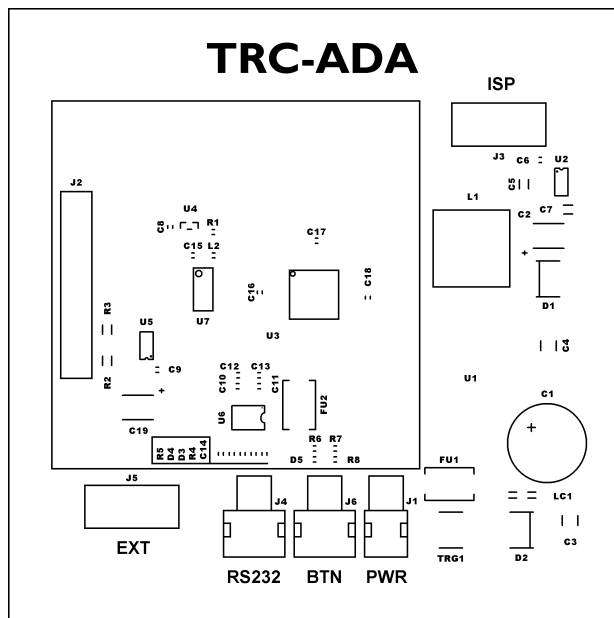
Bottom copper



Top solder resist



Bottom solder resist



LIITE 9: TRC-ADA:N KOMPONENTTILISTAUS

TRC-ADA BOM

Project: TRC-ADA

Date: 30.08.2009

Revision: A

Designer: Eero Alkkiomäki

Category	Reference	Value	Package	Description
Resistors	R1	10k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R8	10k	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R2	120R	1206	5% metal film / thick film
Resistors	R3	120R	1206	5% metal film / thick film
Resistors	R4	B59601A0075B062	0603	Epcos PTC 75 ohm
Resistors	R5	B59601A0075B062	0603	Epcos PTC 75 ohm
Resistors	R6	220R	0603	1% metal film / thick film
Resistors	R7	100k	0603	1% metal film / thick film
Capacitors	C1	330uF	ELEC-RAD20-12.5MM	Sanyo 63ME330AX
Capacitors	C2	220uF	TANT-D	Kemet T495D227K010ATE125
Capacitors	C19	220uF	TANT-D	Kemet T495D227K010ATE125
Capacitors	C3	2.2uF	1210	Kemet 100V X7R
Capacitors	C4	2.2uF	1210	Kemet 100V X7R
Capacitors	C5	10uF	1206	TDK 10V X7R
Capacitors	C7	10uF	1206	TDK 10V X7R
Capacitors	C6	10nF	0603	Kemet 50V X7R
Capacitors	C8	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C9	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C10	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C11	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C12	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C13	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C14	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C15	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C16	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C17	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Capacitors	C18	100nF	0603	Kemet 16V X7R
Integrated Circuits	U1	LM2592HVS-5.0	TO263-5	mfr=National Semiconductor
Integrated Circuits	U2	LP2989AIM-3.3	SO8	mfr=National Semiconductor
Integrated Circuits	U3	ATMEGA644P-20AU	TQFP44	mfr=Atmel
Integrated Circuits	U4	LM809M3-3.08	SOT23	mfr=National Semiconductor
Integrated Circuits	U5	SN65HVD30DR	SO8	mfr=Texas Instruments
Integrated Circuits	U6	ADM3202ARUZ	TSSOP16	mfr=Analog Devices
Integrated Circuits	U7	CB3LV-3I-7M3728	OSC-7MM	mfr=CTS
Diodes	D1	30BQ100	SMC	Vishay schottky
Diodes	D2	30BQ100	SMC	Vishay schottky
Diodes	D3	CDS3C15GTA	0603	Epcos Ceradiode
Diodes	D4	CDS3C15GTA	0603	Epcos Ceradiode
Diodes	D5	CDS3C15GTA	0603	Epcos Ceradiode
Miscellaneous	FU1	SMD050F-2	POLYFUSE-SMD	Polyfuse 500 mA
Miscellaneous	FU2	SMD050F-2	POLYFUSE-SMD	Polyfuse 500 mA
Miscellaneous	J1	AMP 3-794618-2	MICRO-MNL-2NP-TH	mfr=AMP
Miscellaneous	J2	CONN-DIL24-JUNC	CONN-DIL24-STD	mfr=AMP
Miscellaneous	J3	Molex 53398-0671	SMTCRIMP2 06 1-25MM	mfr=Molex
Miscellaneous	J5	Molex 53398-0671	SMTCRIMP2 06 1-25MM	mfr=Molex
Miscellaneous	J4	AMP 3-794618-4	MICRO-MNL-4NP-TH	mfr=AMP
Miscellaneous	J6	AMP 3-794618-4	MICRO-MNL-4NP-TH	mfr=AMP
Miscellaneous	L1	DR127-680-R	DR127	Cooper Bussmann DR127
Miscellaneous	L2	LFBK1608HS220-T	0603	mfr=Taiyo Yuden
Miscellaneous	LC1	NFM61R30T472	NFM61R30T472	Murata 50VDC 2A
Miscellaneous	TRG1	SM15T39CA	SMC-UNPOL	mfr=STMicroelectronics

LIITE 10: TRCCOMM-PROTOKOLLAN KUVAUS

```

=====
=== TRCCOMM protocol specifications ===
=====

A. Message types
=====

0x00: Read TRC information
-----

Request:

<0x00><crc8>

crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

Reply:

<0x80><status><type><version><opmode><commode><addr><crc8>

status = status code, see section B (uint8)
type = TRC type (uint8)
version = TRC software version (uint8)
opmode = TRC operating mode (uint8)
commode = TRC communication mode (uint8)
addr = TRC address (uint8)
crc8 = CRC8 checksum of previous bytes

0x01: Set TRC operating mode
-----

Request:

<0x01><opmode><crc8>

opmode = TRC operating mode, see section E (uint8)
crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

Reply:

<0x81><status><crc8>

status = status code, see section B (uint8)
crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

0x02: Set TRC communication mode
-----

Request:

<0x02><commode><crc8>

commode = TRC communication mode, see section F (uint8)
crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

Reply:

<0x82><status><crc8>

status = status code, see section B (uint8)
crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

```

0x03: Set TRC address

Request:

<0x03><addr><crc8>

addr = TRC address (uint8)

crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

Reply:

<0x83><status><crc8>

status = status code, see section B (uint8)

crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

0x10: Register write

Request:

<0x10><addr><len><data><crc8>

addr = subaddress 0x01 - 0x1F (uint8)

len = data length 0x01 - 0x20 (uint8)

data = data content (uint16[1-32])

crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

Reply:

<0x90><status><crc8>

status = status code, see section B (uint8)

crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

0x11: Register read

Request:

<0x11><addr><crc8>

addr = subaddress 0x01 - 0x1F (uint8)

crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

Reply:

<0x91><status><len><data><crc8>

status = status code, see section B (uint8)

len = data length 0x01 - 0x20 (uint8)

data = data content (uint16[1-32])

crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

0x12: Write stream

Request:

<0x12><len><data><crc8>

len = data length 0x01 - 0x20 (uint8)

data = data content (uint16[1-32])

crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

Reply:

<0x92><status><crc8>

status = status code, see section B (uint8)
 crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

0x13: Read stream

Request:

<0x13><crc8>

crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

Reply:

<0x93><status><len><data><crc8>

status = status code, see section B (uint8)
 len = data length 0x01 - 0x20 (uint8)
 data = data content (uint16[1-32])
 crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

0x14: Write MIL-STD-1553 BC query list

Request:

<0x14><src><dest><src subaddr><dest subaddr><cmd><optdata><pos><crc8>

src = source address 0x01 - 0x1F (uint8)
 dest = destination address 0x01 - 0x1F (uint8)
 src subaddr = source subaddress 0x01 - 0x1F (uint8)
 dest subaddr = destination subaddress 0x01 - 0x1F (uint8)
 cmd = command, see section C (uint8)
 optdata = optional data word (uint16)
 pos = list position 0x0000 - 0xFFFE, 0xFFFF = inject once (uint16)
 crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

Reply:

<0x94><status><crc8>

status = status code, see section B (uint8)
 crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

0x15: Read MIL-STD-1553 BC query list

Request:

<0x15><pos><crc8>

pos = list position 0x0000 - 0xFFFE (uint16)
 crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

Reply:

<0x15><status><src><dest><src subaddr><dest subaddr><cmd><optdata><crc8>

status = status code, see section B (uint8)
 src = source address 0x01 - 0x1F (uint8)
 dest = destination address 0x01 - 0x1F (uint8)
 src subaddr = source subaddress 0x01 - 0x1F (uint8)
 dest subaddr = destination subaddress 0x01 - 0x1F (uint8)
 cmd = command, see section C (uint8)

optdata = optional data word (uint16)
 crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

0x16: Set interrupt type

Request:

<0x16><type><crc8>

type = interrupt type, see section D (uint8)
 crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

Reply:

<0x96><status><crc8>

status = status code, see section B (uint8)
 crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

0x17: Set MIL-STD-1553 bus

Request:

<0x17><bus><crc8>

bus = MIL-STD-1553 bus, 0 = A, 1 = B (uint8)
 crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

Reply:

<0x97><status><crc8>

status = status code, see section B (uint8)
 crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

0x18: Read MIL-STD-1553 BC status

Request:

<0x18><crc8>

crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

Reply:

<0x98><status><rxtract><txtract><mistract><rxerror><txerror><buschg><actbus><lasterr><crc8>

status = status code, see section B (uint8)
 rxtract = RX transactions (uint32)
 txtract = TX transactions (uint32)
 mistract = Missed transactions (uint32)
 rxerror = RX errors (uint32)
 txerror = TX errors (uint32)
 buschg = bus changes (uint32)
 actbus = currently active bus (uint8)
 lasterr = last error code (uint16)
 crc8 = CRC8 checksum of previous bytes (uint8)

B. Status codes
 =====

0x00	Request OK
0x01	General error
0x02	Hardware error

0x03	Invalid command
0x04	Invalid operating mode
0x05	Bad CRC
0x06	Illegal length
0x07	Illegal subaddress
0x08	Buffer empty
0x09	Buffer full
0x0A	No stream subaddress assigned
0x0B	Illegal query list position
0x0C	Invalid interrupt type
0x0D	Invalid communication mode
0x0E	Invalid TRC address

C. Command codes for query list

=====

MIL-STD-1553

0x00	Reserved
0x01	BC to RT
0x02	RT to BC
0x03	RT to RT
0x04	Mode command without data word
0x05	Mode command with data word (RT transmits)
0x06	Mode command with data word (RT receives)
0x07	Broadcast BC to RT
0x08	Broadcast RT to RT
0x09	Broadcast mode command without data word
0x0A	Broadcast mode command with data word

Generic

0x80	JMP	Jump to position
0x81	DLY	Delay in us
0x82	EOL	End of list
0x83	LD	Load data to register
0x84	CMP	Compare with register value
0x85	CMPM	Compare with mask value
0x86	SBR	Set bits in register
0x87	CBR	Clear bits in register
0x88	LEN	Set register length

D. Interrupt types

=====

0x00	No interrupts
0x01	Interrupt when TRC register altered

E. Operating modes

=====

0x00	Inactive
0x10	MIL-STD-1553 BC
0x11	MIL-STD-1553 RT
0x12	MIL-STD-1553 BM
0x13	MIL-STD-1553 BMRT

F. TRC communication modes

=====

0x00	9600 bps 8E1 (default)
0x01	115200 bps 8E1
0x02	921600 bps 8E1
0x03	3686400 bps 8E1